

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**

**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**RAFAEL GIL NASCIMENTO**

**ESTUDO PARA DETERMINAÇÃO DA  
IMPEDÂNCIA HARMÔNICA EM  
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

**UBERLÂNDIA  
2018**

RAFAEL GIL NASCIMENTO

**ESTUDO PARA DETERMINAÇÃO DA  
IMPEDÂNCIA HARMÔNICA EM  
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
a Faculdade de Engenharia Elétrica UFU,  
como requisito parcial para obtenção do  
título de Graduado em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof<sup>o</sup> Dr. Ivan Nunes Santos

UBERLÂNDIA

2018

## **Dedicatória**

*Dedico esse trabalho aos meus  
pais,  
Marcelo e Vanessa, que me proporcionaram  
todo respaldo necessário para sempre me  
dedicar aos meus objetivos.*

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, pela saúde e força para superar todas as dificuldades enfrentadas durante o curso.

Aos meus pais Vanessa e Marcelo que sempre me incentivaram a dar o meu melhor e estiveram sempre comigo me dando o apoio necessário.

À minha namorada Marryele que me estimulou durante este período e pode vivenciar ao meu lado a construção deste trabalho.

À Universidade Federal de Uberlândia e todos os discentes e funcionários dentro dela que contribuíram para minha formação como futuro Engenheiro Eletricista e pessoa.

Ao professor Ivan Nunes que sempre se mostrou disposto a me ajudar neste trabalho, me dando sugestões nas horas de dificuldade.

Ao colega de laboratório Arthur Costa que me auxiliou no desenvolvimento desta dissertação.

E a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a minha formação.

## Sumário

<b>RESUMO.....</b>	<b>2</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>3</b>
<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>4</b>
<b>Lista de Gráficos.....</b>	<b>5</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>6</b>
<b>1   INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
<b>2   OBJETIVOS .....</b>	<b>13</b>
<b>3   DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>14</b>
<b>4   CONCLUSÃO.....</b>	<b>50</b>
<b>5   REFERÊNCIAS .....</b>	<b>51</b>

## RESUMO

Com as instalações industriais cada vez mais aumentando o uso de cargas não lineares como fornos a arco e de indução, computadores, inversores de frequências, dispositivo eletrônicos de partida de motores, máquinas de solda, conversores, ocorre um aumento considerável na inserção de correntes harmônicas na rede elétrica. Com isso, a qualidade de energia é diretamente afetada, podendo proporcionar níveis de tensão, corrente e frequência anormais que resultam em falhas operacionais de certos dispositivos ou sistemas. Deste modo, é imprescindível os estudos referentes aos impactos que harmônicos de tensão e corrente causam nos diversos elementos do sistema elétrico.

Sendo assim, esta dissertação visa a análise prática e computacional de impedâncias harmônicas em transformadores de potência, que são elementos fundamentais em quaisquer sistemas elétricos.

**Palavras chaves:** Transformadores; Correntes Harmônicas; Cargas não lineares; Impedância Harmônica

## ABSTRACT

With industrial installations increasingly increasing the use of non-linear loads such as arc and induction furnaces, computers, frequency inverters, electronic starting devices for motors, welding machines, converters, there is a considerable increase in the insertion of harmonic currents in the power grid. As a result, the power quality is directly affected and can cause abnormal voltage, current and frequency levels that result in operational failures of certain devices or systems. Therefore, it is essential to study the impact of harmonics of voltage and current on the various elements of the electrical system.

Thus, this dissertation aims at the practical and computational analysis of harmonic impedances in power transformers, which are fundamental elements in any electrical systems.

**Keywords:** Transformers, Harmonics Currents, Non Linear Loads, Harmonic Impedance

## Lista de Figuras

Figura 1 - Ensaio a Vazio .....	9
Figura 2 - Ensaio de Curto-Circuito .....	11
Figura 3 - Diagrama Unifilar .....	12
Figura 4 - Transformador de Ensaio .....	14
Figura 5 - Fonte Controlada.....	15
Figura 6 - Qualímetro .....	16
Figura 7 - Diagrama Fasorial do Ensaio de Curto-Circuito .....	17
Figura 8 - Diagrama Fasorial do Ensaio a Vazio .....	20
Figura 9 - Diagrama Unifilar (delta-delta) .....	22
Figura 10 - Forma de Onda da Corrente de Magnetização.....	22
Figura 11 - Espectro Harmônico da Corrente de Magnetização .....	23
Figura 12 - Diagrama Fasorial do Ensaio em Curto .....	24
Figura 13 - Diagrama Unifilar (Estrela-Estrela).....	26
Figura 14 - Diagrama Fasorial do Ensaio em Curto com Harmônico .....	28
Figura 15 - Sinal de Corrente Distorcido .....	29
Figura 16 - Sinal de Tensão Distorcido .....	29
Figura 17 - Forma de Onda de Corrente.....	37
Figura 18 – Parametrização (Delta-Delta).....	45
Figura 19 - Circuito Simulado (Delta-Delta).....	45
Figura 20 - Simulação da Tensão de Curto .....	46
Figura 21 - Simulação da Corrente de Curto .....	46
Figura 22 - Parametrização (Estrela-Estrela).....	47
Figura 23 - Circuito Simulado (Estrela-Estrela).....	48
Figura 24 - Onda de Corrente Simulada (Estrela-Estrela).....	48
Figura 25 – Onda de Tensão Simulada (Estrela-Estrela) .....	49



## Lista de Gráficos

Gráfico 1 - Espectro Harmônico de Corrente .....	30
Gráfico 2 - Espectro Harmônico de Tensão .....	30
Gráfico 3 - Resistência $R_a$ x Ordem Harmônica (Delta-Delta).....	33
Gráfico 4 - Indutância $L_a$ x Ordem Harmônica (Delta-Delta).....	33
Gráfico 5 - Resistência $R_b$ x Ordem Harmônica (Delta-Delta).....	34
Gráfico 6 - Indutância $L_b$ x Ordem Harmônica (Delta-Delta) .....	34
Gráfico 7 - Resistência $R_c$ x Ordem Harmônica (Delta-Delta).....	35
Gráfico 8 - Indutância $L_c$ x Ordem Harmônica (Delta-Delta) .....	35
Gráfico 9 - Espectro harmônico de Corrente .....	36
Gráfico 10 - Espectro Harmônico de Tensão .....	36
Gráfico 11 - Resistência $R_a$ x Ordem Harmônica (Estrela-Estrela).....	40
Gráfico 12 - Indutância $L_a$ x Ordem Harmônica (Estrela-Estrela) .....	41
Gráfico 13 - Resistência $R_b$ x Ordem Harmônica (Estrela-Estrela).....	42
Gráfico 14 - Indutância $L_b$ x Ordem Harmônica (Estrela-Estrela) .....	43
Gráfico 15 - Resistência $R_c$ x Ordem Harmônica (Estrela-Estrela).....	43
Gráfico 16 - Indutância $L_c$ x Ordem Harmônica (Estrela-Estrela) .....	44

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Medições do Ensaio de Curto-Circuito .....	17
Tabela 2 - Medições do Ensaio a Vazio .....	19
Tabela 3 - Medições do Ensaio em Curto.....	24
Tabela 4 - Distribuição das Ordens Harmônicas .....	27
Tabela 5 - Impedâncias Harmônicas (Fase A).....	31
Tabela 6 - Impedâncias Harmônicas (Fase B).....	31
Tabela 7 - Impedâncias Harmônicas (Fase C).....	32
Tabela 8 - Impedâncias Harmônicas (Fase A).....	38
Tabela 9 - Impedância Harmônica (Fase B).....	38
Tabela 10 - Impedância Harmônica (Fase C).....	39

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Motivação

A energia elétrica é de extrema importância no mundo atual. Sua disponibilidade pode ser considerada um direito humano básico, do mesmo modo que alimentação e moradia. Em termos de suprimento energético, a eletricidade se tornou uma das formas mais versáteis e convenientes de energia, se tornando um recurso indispensável para o desenvolvimento de um país.

No limiar do terceiro milênio, os avanços tecnológicos em geração, transmissão e uso final de energia elétrica permitem que ela chegue aos mais diversos lugares do planeta, transformando regiões desocupadas ou pouco desenvolvidas em polos industriais e grandes centros urbanos [1].

Neste cenário são requeridos estudos complementares a respeito da qualidade de energia elétrica. No tocante o termo “Qualidade de Energia” é definido como sendo qualquer desvio que possa ocorrer na amplitude, forma de onda ou frequência da tensão e/ou corrente elétrica, resultando ou não na operação inadequada de equipamentos consumidores, afetando, assim, diretamente a eficiência energética do sistema [2].

Devido à grande importância que o assunto “Qualidade de Energia” assumiu no cenário elétrico atual, vários estudos, pesquisas e desenvolvimentos vem sendo feitos com o intuito de conhecer, assegurar ou mesmo melhorar os padrões de qualidade requeridos ao bom funcionamento dos sistemas elétricos. Este tema vem ganhando destaque e importância no cenário elétrico nacional, tanto por parte das concessionárias, como também por consumidores industriais, comerciais e residenciais. Abaixo, tem-se algumas razões que contribuem para o crescimento da importância desta área do conhecimento [3]:

- Grande crescimento da utilização de equipamentos que utilizam de eletrônica de potência que aumentam os níveis de distorção harmônica de tensão e/ou corrente em função de suas não linearidades nos sistemas de potência;
- Os equipamentos que atualmente vem sendo utilizados nos sistemas de energia são mais sensíveis a variações de qualidade de energia. Antigamente, distúrbios que aconteciam no sistema e que não havia interferência no funcionamento dos

equipamentos, agora são responsáveis por problemas de operação que até então não existiam tendo em vista sua robustez.

- O aumento de capacitores em derivação em sistemas de potência destinados à correção do fator de potência, alterando a impedância do sistema, podendo causar ressonância que, por sua vez, podem causar tensões transitórias.
- Os custos operacionais relacionados com a manutenção ou substituição prematura de equipamentos danificados por problemas relacionados com a energia elétrica de má qualidade.
- Crescente aumento de geração de energia fotovoltaica, que contribui para geração de conteúdos harmônicos no sistema devido a presença de conversores de potência, principalmente em redes de distribuição.
- O aumento da participação da energia eólica na matriz energética brasileira com a conexão de complexos eólicos na rede aumenta o número de componentes com característica não lineares. Estes componentes são associados à operação de geradores de indução, transformadores de potência e conversores eletrônicos acoplados as máquinas síncronas, sendo que a conexão dos geradores através dos conversores de potência é mais crítica quando se trata de conteúdos harmônicos e estudos correlatos [4].

Desta forma, focando especificamente no impacto dos harmônicos no sistema elétrico, torna-se necessário estudar sua propagação. Para tanto, é imprescindível o estabelecimento de modelos fiéis dos diversos elementos presentes na rede, afim de ser possível a investigação e a análise do impacto destes harmônicos no sistema.

Sendo assim, esta monografia tem como objetivo conduzir investigações acerca do modelo representativo de transformadores trifásicos empregado em ambiente com presença de distorções harmônicas. Nestes termos, serão conduzidas modelagens dos principais parâmetros deste dispositivo com foco à análise de suas impedâncias harmônicas e também aspectos gerais de propagação de correntes não lineares.

## 1.2 Transformadores e Parametrização

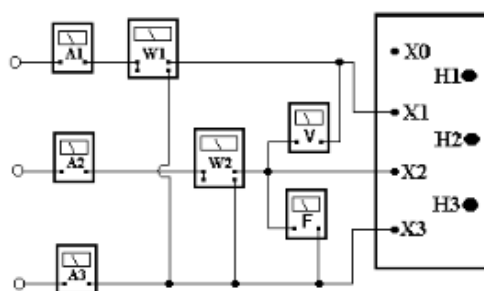
Transformadores são máquinas elétricas que transformam energia elétrica em energia elétrica, mantendo inalteradas todas as características de energia elétrica de saída em relação a energia elétrica de entrada, com exceção dos valores da tensão e corrente. Independentemente do valor da carga que alimentam.

Os sistemas elétricos atuais, não existiriam sem os transformadores de potência, pois sem eles a geração de grandes blocos de energia distantes dos centros de consumo, aproveitando recursos naturais locais, tais como cursos d'água e reservas de combustíveis, seria inviável. A inviabilidade seria resultado, sem os transformadores, da necessidade de se gerar energia da tensão de consumo, o que implicaria em grandes correntes serem transmitidas, com a consequente imposição de condutores de seção muito grande, sob pena de grandes perdas de energia e quedas de tensão [5].

Para se determinar os parâmetros de um transformador, é necessário a realização de dois ensaios. O primeiro, denominado ensaio a vazio, é necessário para se determinar os parâmetros do núcleo do transformador. Para isto, o transformador deve ser submetido a sua tensão nominal, pois os valores do ramo magnetizante variam de acordo com a tensão aplicada, devido a não linearidade do núcleo, e aferir seus valores de corrente e potência.

Na Figura 1 está representado o esquema de ligação deste ensaio, com as medições referidas ao lado do primário, e o secundário em aberto.

Figura 1 - Ensaio a Vazio



Fonte: Transformadores de Potência, UFU, 2014 [6]

Os cálculos de seus parâmetros são feitos sempre por fase, independentemente da ligação dos transformadores. Assim, temos que a impedância total do núcleo ( $Z_m$ ) é dada por:

$$Z_m = \frac{V_{fn}}{I_{0f}} \quad (1.0)$$

Onde:

- $V_{fn}$  = Tensão nominal por fase;
- $I_{0f}$  = Corrente a vazio por fase.

Como os componentes do ramo magnetizante não possuem existência física, a representação dos fenômenos de magnetização pode ser feita com uma resistência em paralelo com uma reatância ou com uma resistência em série com uma reatância, desde que sua combinação seja igual a impedância  $Z_m$  [6]. Nesta dissertação será adotada a representação em paralelo, desta forma temos que a resistência equivalente das perdas no ferro ( $R_{mp}$ ) e a reatância de magnetização do ramo paralelo ( $X_{mp}$ ) é dada por:

$$R_{mp} = \frac{P_{of}}{I_p^2} \quad (1.1)$$

$$X_{mp} = \frac{V_{fn}}{I_q} \quad (1.2)$$

Onde:

- $P_{of}$  = Potência a vazio por fase.
- $I_p$  = Componente de perdas no ferro da corrente a vazio;
- $I_q$  = Componente de magnetização da corrente a vazio.

$$I_p = I_{0f} \cos \phi_0 \quad (1.3)$$

$$I_q = I_{0f} \sin \phi_0 \quad (1.4)$$

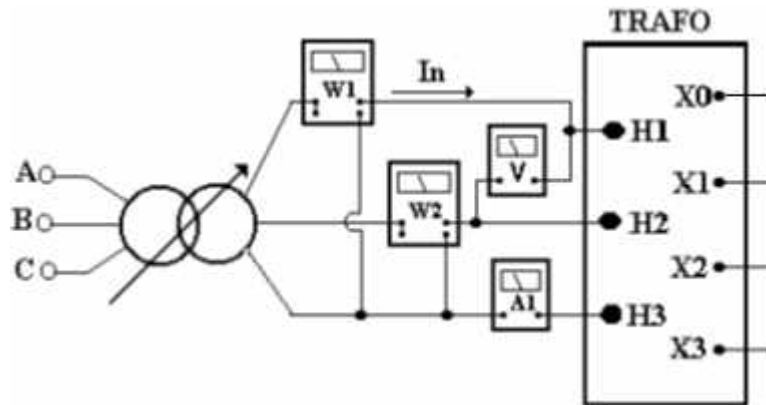
Sendo que:

- $\cos \phi_0$  = Fator de potência a vazio;

O ensaio em curto-circuito, é fundamental para a determinação dos parâmetros dos enrolamentos de cobre do transformador. Nele pode-se determinar a resistência dos enrolamentos e reatância de dispersão. Para isso, é necessário curto-circuitar um dos lados do transformador e impor a corrente nominal, aferindo os valores de tensão e corrente de cada fase.

Na Figura 2 está referenciado o esquema de ligação deste ensaio, referindo-se ao lado do secundário.

Figura 2 - Ensaio de Curto-Circuito



Fonte: Transformadores de Potência, UFU, 2014 [6]

De forma análoga ao ensaio a vazio, o cálculo dos parâmetros do ensaio em curto é feito sempre por fase. Sendo assim, tem-se que a resistência dos enrolamentos de cobre ( $R_s$ ) é dada por:

$$R_s = \frac{P_{ccfn}}{I_{fn}^2} \quad (1.5)$$

Onde:

- $P_{ccfn}$  = Potência de curto-circuito por fase;
- $I_{fn}$  = Corrente nominal por fase;

A impedância representativa (ou equivalente) das perdas de dispersão dos enrolamentos é dada por:

$$Z_s = \frac{V_{ccfn}}{I_{fn}} \quad (1.6)$$

Onde:

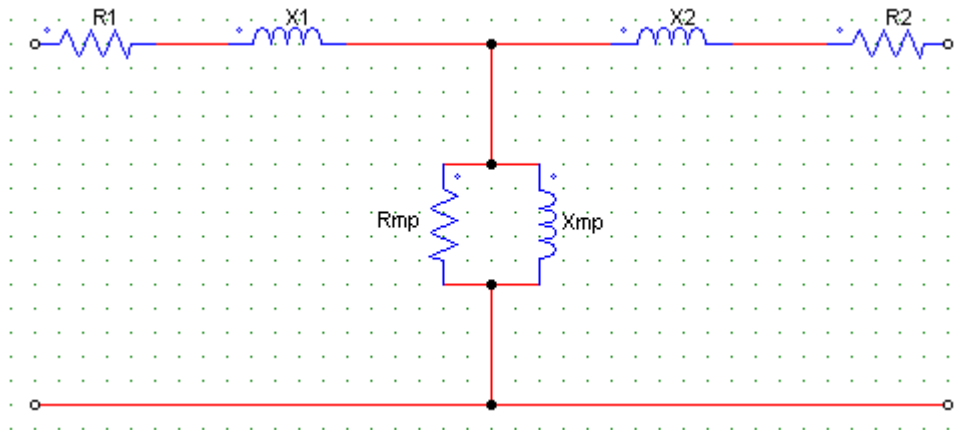
- $V_{fn}$  = Tensão por fase;

A reatância representativa das perdas de dispersão dos enrolamentos de cobre, pode ser encontrada a partir da Equação 1.7, abaixo.

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} \quad (1.7)$$

Na figura abaixo é possível observar o circuito equivalente de um transformador.

Figura 3 - Diagrama Unifilar



Fonte: Elaborada pelo autor

Onde:

$$R_1 = R_2 = \frac{R_s}{2} \quad (1.8)$$

$$X_1 = X_2 = \frac{X_s}{2} \quad (1.9)$$

### 1.3 Componente de Terceiro Harmônico

Em transformadores monofásicos, o caminho de circulação dos harmônicos de corrente é sempre a malha fechada do primário, não havendo nenhuma restrição à circulação de qualquer harmônico. Já em transformadores trifásicos, dependendo da conexão dos lados do transformador, isso nem sempre é possível [6].

As componentes de 3º harmônico de corrente de magnetização nos transformadores trifásicos, cujas fundamentais estão defasadas de 120°, estão defasadas entre si de 360 graus (3 x 120°). Isto significa que elas estão em fase. Nas conexões em triângulo, estas correntes circulam dentro do triângulo, sem maiores problemas [6].

Diferentemente, em conexões em estrela, a circulação destas correntes somente será possível se o neutro da conexão estiver ligado à fonte ou à carga, dependendo do lado em que a estrela estiver, pois estando em fase e com o neutro isolado, a única forma de atender a 1ª Lei de Kirchhoff, é com valor zero para as componentes de 3º harmônico da corrente [6].

Já nas conexões estrela com neutro aterrado, seja do lado primário em que a fonte também estiver ligada em estrela com o seu neutro também aterrado ou do lado do



secundário em que a carga também estiver ligada em estrela com o seu neutro igualmente aterrado, as componentes de 3º harmônico circulam com intensidade tripla do valor de cada fase na linha neutra e a componente harmônica de 3º ordem no neutro, corresponde a três vezes o valor da mesma componente na linha. [6].

Por outro lado, o uso de conexão estrela isolada com a consequente impossibilidade de circulação da componente de 3º harmônico da corrente de magnetização, fará com que as tensões induzidas nos enrolamentos de cada fase sejam maiores do que se espera. Estas tensões podem ocasionar danos ao isolamento interno do transformador ou redução de vida útil do mesmo [6].

Finalmente, o estudo de propagação de 3º harmônico em transformadores se faz necessário visto o impacto ao equipamento e ao sistema elétrico como um todo.

## **2 OBJETIVOS**

O presente trabalho busca estudar e modelar transformadores de potência submetidos a variadas componentes harmônicas fazendo um experimento real e comprovando-o através de simulações pelo software *Psim*.

Para se alcançar este objetivo, alguns tópicos devem ser atendidos, dentre eles:

- Fazer uma revisão bibliográfica geral do tema proposto, aprofundando nos principais conceitos que envolvem transformadores e distorções harmônicas;
- Conhecer e aperfeiçoar conhecimentos no software *Psim*;
- Realizar um experimento real com transformador injetando ordens harmônicas;
- Interpretar o estudo comprovando-o a partir de simulações.

### 3 DESENVOLVIMENTO

Neste tópico será apresentado toda metodologia utilizada no ensaio prático, bem como os equipamentos de laboratório e sequência de ensaios. Após, será apresentado a simulação com os valores aferidos no ensaio prático

#### 3.1 Equipamentos utilizados

Abaixo, tem-se a figura do transformador utilizado para ensaio.

Pelos seus dados de placa pode-se constatar que:

- Tipo: Trifásico
- Ligação: terminais disponíveis para conexões em delta ou estrela;
- Relação de Transformação: 1:1;
- Potência Nominal: 3 kVA;
- Corrente Nominal: 3,9A
- Tensão Nominal AT/BT: 220V/220V (Obs: esta é a real tensão nominal deste transformador, apesar de seus dados de placa informar uma tensão distinta deste valor, a qual se refere tão somente ao seu nível de isolamento);
- Frequência: 60Hz

Figura 4 - Transformador de Ensaio



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 5, tem-se a fonte utilizada no processo de fornecimento de tensão e corrente.

Seus dados são:

- Fabricante/Modelo: California Instruments/CSW5550
- Input Power: 208V a 240V  $\pm 10\%$  3 $\phi$  ou 380V a 415V  $\pm 10\%$  3 $\phi$ ;
- Máxima corrente de linha: 27A RMS;
- Frequência de Saída: DC, ou 40 Hz a 5 kHz;
- Potência de saída: 1850VA, máximo, por fase.
- Saída de Tensão AC/DC: 0 a 156 VRMS – 0 a 312 VRMS.
- Corrente de Saída por Fase: 16A para 115V na classe de 156V – 8A para 230V na classe de 312V.

Figura 5 - Fonte Controlada



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 6, tem-se o qualímetro utilizado para aferir todas as medições.

Seus dados são:

- Modelo/Fabricante: Nexus 1500/Nansen;
- Corrente Máxima Trifásica: 20A;
- Classe: D;
- Tensão de Alimentação: 120V/220V;
- Analisador de Fenômenos de Qualidade da Energia.

Figura 6 - Qualímetro



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.2 Determinação dos Parâmetros do Transformador na Frequência Fundamental (Procedimento Tradicional) – Ligação Delta-Delta

De acordo com o tópico 1.2 desta dissertação, os ensaios em curto e à vazio se fazem necessários quando se deseja determinar os parâmetros de um transformador.

Desta forma, neste primeiro ensaio, foi curto-circuitado o secundário do transformador e realizando as medições no primário através do qualímetro. A tensão puramente senoidal foi imposta pela fonte e elevada gradualmente afim de chegar a corrente nominal do transformador, e assim, coletar as medições. Calculando-se a corrente nominal do transformador considerando a ligação delta-delta, tem-se:

$$I_N = \frac{P_n}{\sqrt{3} * V_N} \Rightarrow I_N = \frac{3000}{\sqrt{3} * 220} \Rightarrow I_N = 7,86A$$

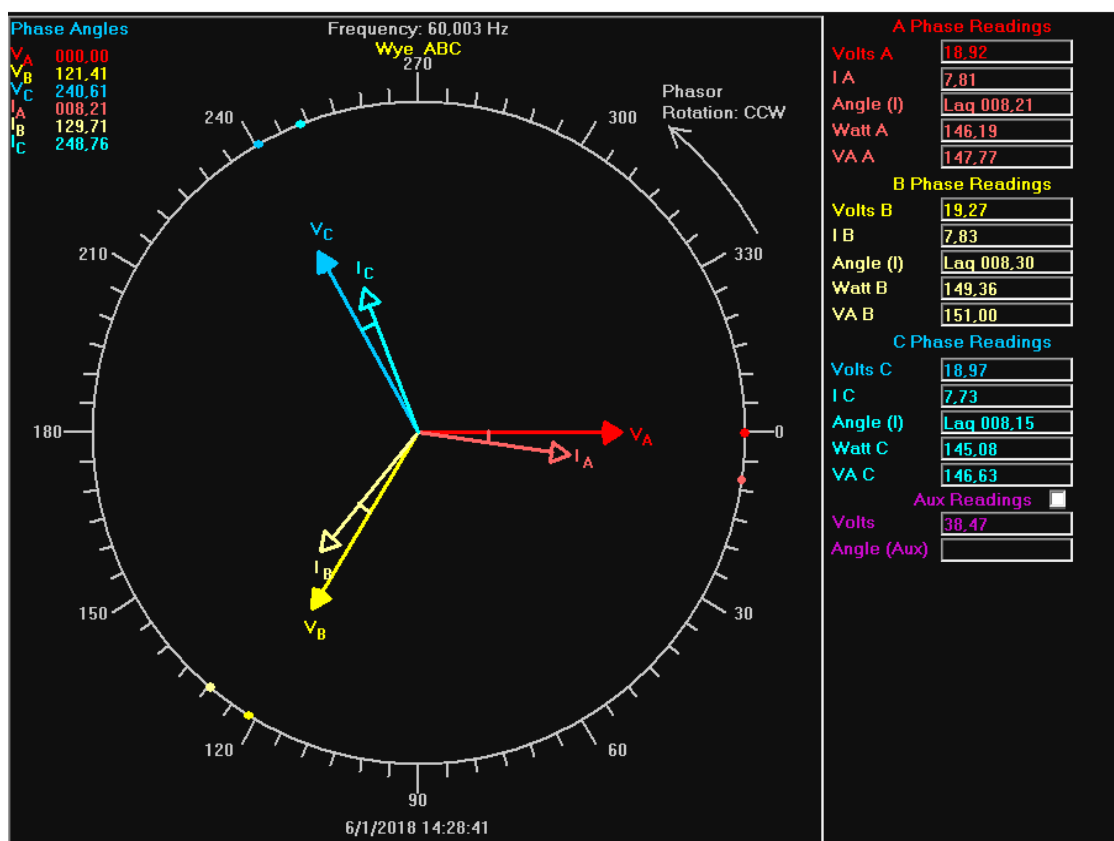
A Tabela 1 referenciada abaixo mostra os dados coletados de tensão, corrente e potência por fase deste ensaio.

Tabela 1 - Medições do Ensaio de Curto-Circuito

Medições	
V <sub>cca</sub> (V)	18,90
V <sub>ccb</sub> (V)	19,28
V <sub>ccc</sub> (V)	18,96
I <sub>cca</sub> (A)	7,84
I <sub>ccb</sub> (A)	7,86
I <sub>ccc</sub> (A)	7,75
W <sub>a</sub> (W)	143,30
W <sub>b</sub> (W)	146,24
W <sub>c</sub> (W)	142,18

O diagrama fasorial da Figura 7, mostra a relação dos fasores de tensão e corrente, podendo observar que a corrente está atrasada em relação a tensão, característica de um transformador em curto, onde se predomina o circuito indutivo provido das reatâncias de dispersão.

Figura 7 - Diagrama Fasorial do Ensaio de Curto-Circuito



Fonte: Elaborada pelo autor.

Desta forma, a partir da Equação 1.5, pode-se determinar a resistência dos enrolamentos do cobre:

$$R_a = \frac{143,30}{(7,84)^2} \Rightarrow R_a = 2,33\Omega$$

$$R_b = \frac{146,24}{(7,86)^2} \Rightarrow R_b = 2,37\Omega$$

$$R_c = \frac{142,18}{(7,75)^2} \Rightarrow R_c = 2,37\Omega$$

Assim, a partir da Equação 1.6, pode-se determinar a impedância dos enrolamentos:

$$Z_a = \frac{18,90}{(7,84)} \Rightarrow Z_a = 2,41\Omega$$

$$Z_b = \frac{19,28}{(7,86)} \Rightarrow Z_b = 2,45\Omega$$

$$Z_c = \frac{18,96}{(7,75)} \Rightarrow Z_c = 2,45\Omega$$

Com os parâmetros de impedância e resistência dos enrolamentos, pode-se calcular a reatância por fase. Assim, a partir da Equação 1.7:

$$X_a = \sqrt{Z_a^2 - R_a^2} \Rightarrow X_a = \sqrt{2,41^2 - 2,33^2} \Rightarrow X_a = j0,61\Omega$$

$$X_b = \sqrt{Z_b^2 - R_b^2} \Rightarrow X_b = \sqrt{2,45^2 - 2,37^2} \Rightarrow X_b = j0,62\Omega$$

$$X_c = \sqrt{Z_c^2 - R_c^2} \Rightarrow X_c = \sqrt{2,45^2 - 2,37^2} \Rightarrow X_c = j0,62\Omega$$

Para simplificação dos cálculos, adota-se a média das reatâncias e resistências para representação do circuito unifilar. Assim, tem-se

$$R_s = \frac{R_a + R_b + R_c}{3} \Rightarrow R_s = \frac{2,33 + 2,37 + 2,37}{3} \Rightarrow R_s = 2,37\Omega$$

$$X_s = \frac{X_a + X_b + X_c}{3} \Rightarrow X_s = \frac{j0,61 + j0,62 + j0,62}{3} \Rightarrow X_s = j0,62\Omega$$

$$L_s = \frac{X_s}{2 * \pi * 60} \Rightarrow L_s = \frac{j0,62}{2 * \pi * 60} \Rightarrow L_s = 1,64mH$$

Lembrando que estes parâmetros são equivalentes totais ao primário e secundário. A partir das Equações 1.7 e 1.8 é possível encontrar as componentes do primário e secundário, separadamente.

$$R_1 = R_2 = \frac{2,37}{2} = 1,19\Omega$$

$$X_1 = X_2 = \frac{j0,62}{2} = j0,31\Omega$$

$$L_1 = L_2 = \frac{1,64}{2} = 0,82mH$$

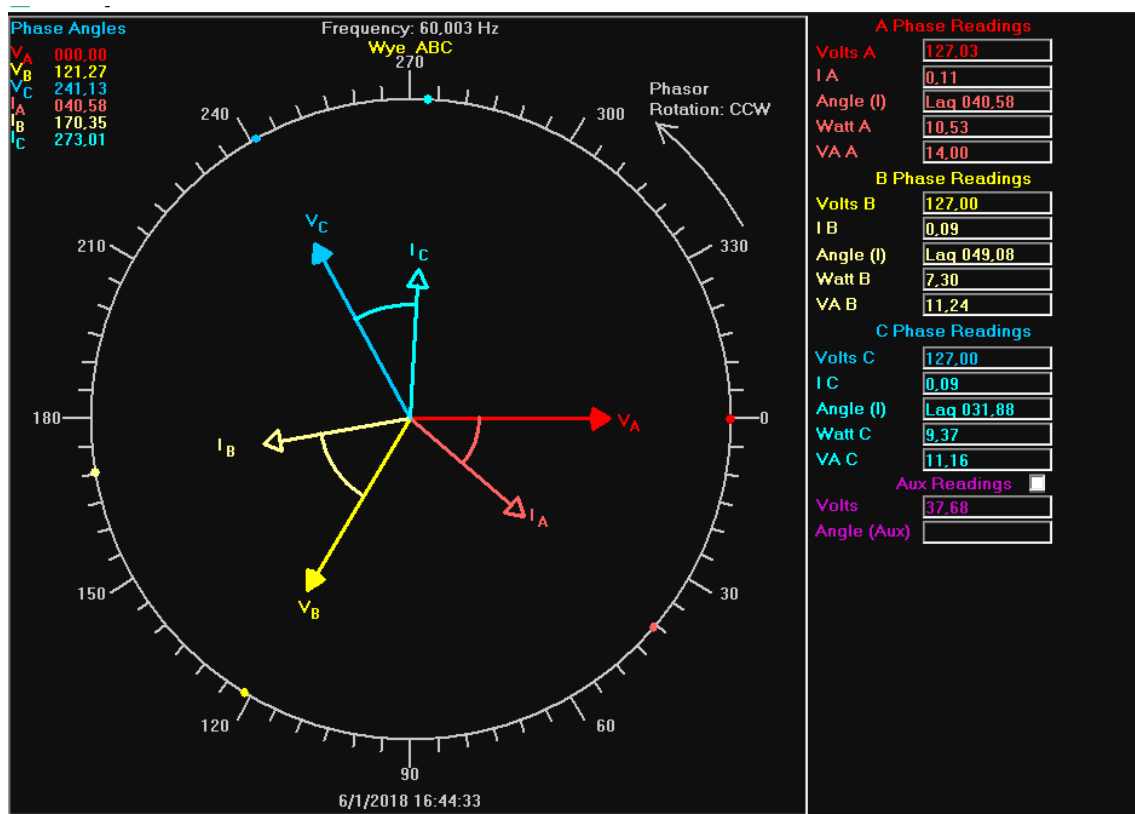
Como também introduzido pela Seção 1.2 desta dissertação, pelo ensaio a vazio, pode-se determinar os parâmetros do ramo magnetizante do transformador. Desta forma, foi aplicado a tensão nominal no primário do transformador e aferido os valores de corrente e potência por fase, como demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Medições do Ensaio a Vazio

Van (V)	127,03
Vbn (V)	127,00
Vcn (V)	127,00
IOa (A)	0,11
IOb(A)	0,09
IOc (A)	0,09
W0a (W)	10,53
W0b (W)	7,30
W0c (W)	9,37

O diagrama fasorial da Figura 8 mostra a disposição dos fasores de tensão e corrente para este ensaio. Semelhantemente ao ensaio em curto, a corrente se mostra novamente atrasada da tensão, no entanto, este atraso é mais acentuado neste ensaio, pois, o ramo magnetizante apresenta uma alta indutância, fazendo com o ângulo de fator de potência ( $\phi$ ), seja maior.

Figura 8 - Diagrama Fasorial do Ensaio a Vazio



Fonte: Elaborada pelo autor.

Desta forma temos a corrente a vazio, expressa pela média das correntes de cada fase.

$$I_0 = \frac{I_{a0} + I_{b0} + I_{c0}}{3} \Rightarrow I_0 = \frac{0,11 + 0,09 + 0,09}{3} \Rightarrow I_0 = 0,10A$$

O mesmo procedimento é feito para a potência por fase:

$$W_0 = \frac{W_{a0} + W_{b0} + W_{c0}}{3} \Rightarrow W_0 = \frac{10,53 + 7,30 + 9,37}{3} \Rightarrow W_0 = 9,07W$$

Pelo diagrama fasorial, pode-se encontrar o fator de potência de cada fase, e assim encontrar o ângulo  $\phi$ .

$$\phi_A = 40,58^\circ \Rightarrow \cos(\phi_A) = 0,76$$

$$\phi_B = 49,08^\circ \Rightarrow \cos(\phi_B) = 0,66$$

$$\phi_C = 31,88^\circ \Rightarrow \cos(\phi_C) = 0,85$$

$$\sin(\phi_A) = 0,65$$

$$\sin(\phi_B) = 0,76$$

$$\sin(\phi_C) = 0,53$$



Com estes ângulos é possível encontrar as correntes derivadas do ramo em paralelo, conforme Equações 1.3 e 1.4.

$$I_{pa} = 0,11 \times 0,76 \Rightarrow I_{pa} = 0,084A$$

$$I_{pb} = 0,09 \times 0,66 \Rightarrow I_{pb} = 0,059A$$

$$I_{pc} = 0,09 \times 0,85 \Rightarrow I_{pc} = 0,077A$$

$$I_{qa} = 0,11 \times 0,65 \Rightarrow I_{qa} = 0,072A$$

$$I_{qb} = 0,09 \times 0,76 \Rightarrow I_{qb} = 0,068A$$

$$I_{qc} = 0,09 \times 0,53 \Rightarrow I_{qc} = 0,048A$$

Conforme as Equações 1.1 e 1.2, pode-se encontrar a resistência e reatância do ramo magnetizante.

$$R_{mpa} = \frac{10,53}{0,084^2} \Rightarrow 1.492,34\Omega$$

$$R_{mpb} = \frac{7,30}{0,059^2} \Rightarrow 2.097,09\Omega$$

$$R_{mpc} = \frac{9,37}{0,077^2} \Rightarrow 1.580,37\Omega$$

$$X_{mpa} = \frac{127,03}{0,072} \Rightarrow j1.764,30\Omega$$

$$X_{mpb} = \frac{127}{0,068} \Rightarrow j1.867,64\Omega$$

$$X_{mpc} = \frac{127}{0,048} \Rightarrow j2.645,83\Omega$$

Assim, fazendo a média das resistências e reatâncias para as 3 fases, temos

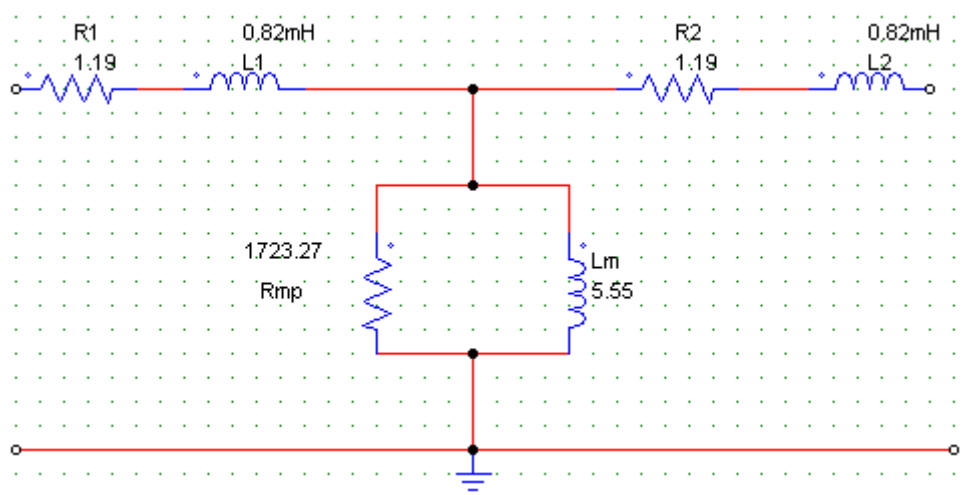
$$R_{mp} = \frac{1.492,34 + 2.097,09 + 1.580,37}{3} \Rightarrow R_{mp} = 1.723,27\Omega$$

$$X_{mp} = \frac{j1.764,30 + j1.867,64 + j2.645,83}{3} \Rightarrow X_{mp} = j2.092,60\Omega$$

$$L_m = \frac{X_{mp}}{2 * \pi * 60} \Rightarrow L_m = \frac{j2.092,60}{2 * \pi * 60} \Rightarrow L_m = 5,55H$$

Com todos os parâmetros do circuito do transformador calculados, pode-se modelar o diagrama unifilar, referenciado na Figura 9

Figura 9 - Diagrama Unifilar (delta-delta)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Devido a não linearidade do núcleo magnético e necessidade de suprir um fluxo senoidal, a corrente de excitação tem como característica forma de onda com presença de conteúdos harmônicos. Na Figura 10 e 11, pode-se observar a distorção desta onda, bem como os espectros de harmônicos mais representativos.

Figura 10 - Forma de Onda da Corrente de Magnetização



Fonte: Elaborada pelo autor.

O espectro harmônico da corrente de magnetização para a ligação do transformador em delta, mostra que para componentes harmônicas múltiplas de 3 é desprezível, pelo fato desta configuração não apresentar conexão com neutro, portanto não há caminho para circulação desta ordem.

Figura 11 - Espectro Harmônico da Corrente de Magnetização



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.3 Determinação dos Parâmetros do Transformador na Frequência Fundamental (Procedimento Tradicional) – Ligação Estrela-Estrela

Nesta seção, foi realizada a determinação dos parâmetros do transformador com a configuração estrela-estrela, com o neutro em comum com a fonte controladora.

Assim, foi realizado o ensaio em curto, curto-circuitado o secundário do transformador e realizando as medições no primário através do qualímetro. A tensão puramente senoidal foi imposta pela fonte e elevada gradualmente afim de chegar a corrente nominal do transformador, e assim, coletar as medições. Calculando-se a corrente nominal do transformador considerando a ligação estrela-estrela, tem-se:

$$I_N = \frac{P_n}{3 * V_N} \Rightarrow I_N = \frac{3000}{3 * 220} \Rightarrow I_N = 4,55A$$

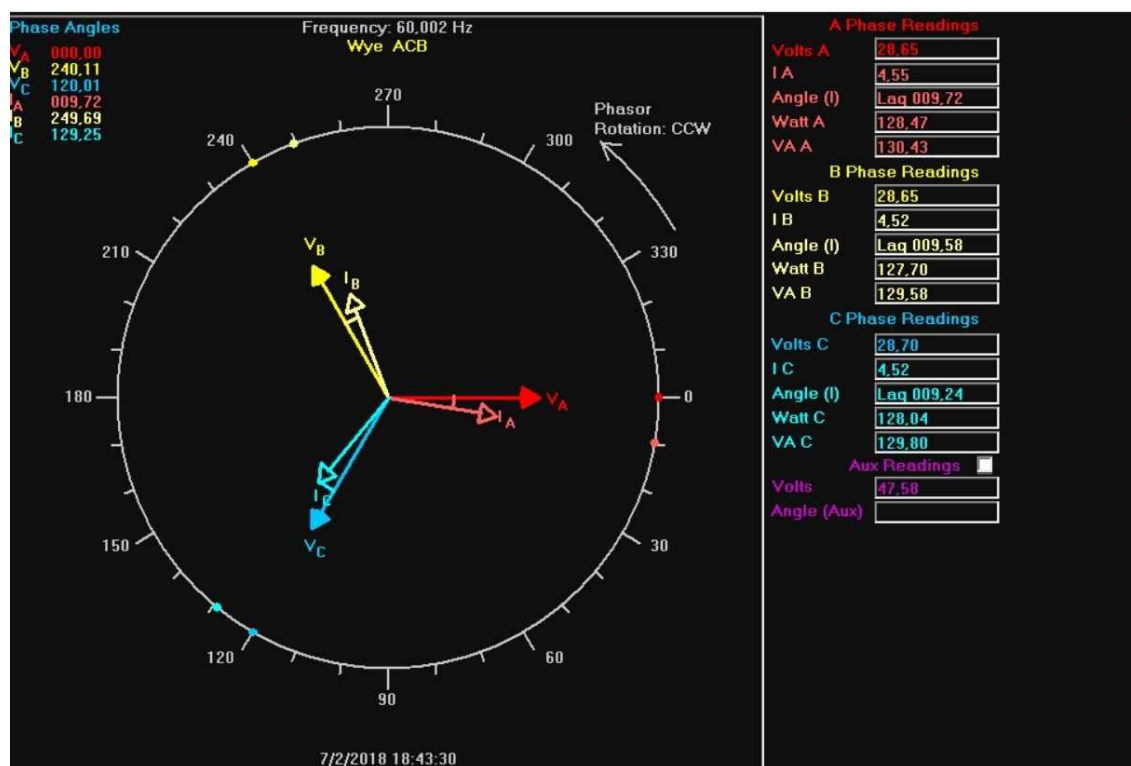
A Tabela 3 referenciada abaixo mostra os dados coletados de tensão, corrente e potência por fase deste ensaio.

Tabela 3 - Medições do Ensaio em Curto

Medições	
V <sub>cca</sub> (V)	28,65
V <sub>c cb</sub> (V)	28,65
V <sub>ccc</sub> (V)	28,70
I <sub>cca</sub> (A)	4,55
I <sub>c cb</sub> (A)	4,52
I <sub>ccc</sub> (A)	4,52
W <sub>a</sub> (W)	128,47
W <sub>b</sub> (W)	127,70
W <sub>c</sub> (W)	128,04

Do mesmo modo que o diagrama fasorial do ensaio em curto apresentado na Seção 3.2 desta monografia, na Figura 12, mostra a relação dos fasores de tensão e corrente, podendo observar que a corrente está atrasada em relação a tensão, característica de um transformador em curto, onde se predomina o circuito indutivo provido das reatâncias de dispersão.

Figura 12 - Diagrama Fasorial do Ensaio em Curto



Fonte: Elaborada pelo autor.

Desta forma, a partir da Equação 1.5, pode-se determinar a resistência dos enrolamentos do cobre:

$$R_a = \frac{128,47}{(4,55)^2} \Rightarrow R_a = 6,20\Omega$$

$$R_b = \frac{127,70}{(4,52)^2} \Rightarrow R_b = 6,25\Omega$$

$$R_c = \frac{128,04}{(4,52)^2} \Rightarrow R_c = 6,27\Omega$$

Assim, a partir da Equação 1.6, pode-se determinar a impedância total dos enrolamentos:

$$Z_a = \frac{28,65}{(4,55)} \Rightarrow Z_a = 6,29\Omega$$

$$Z_b = \frac{28,65}{(4,52)} \Rightarrow Z_b = 6,33\Omega$$

$$Z_c = \frac{28,70}{(4,52)} \Rightarrow Z_c = 6,34\Omega$$

Com os parâmetros de impedância total e resistência dos enrolamentos, pode-se calcular a reatância por fase. Assim, a partir da Equação 1.7:

$$X_a = \sqrt{Z_a^2 - R_a^2} \Rightarrow X_a = \sqrt{6,29^2 - 6,20^2} \Rightarrow X_a = j1,06\Omega$$

$$X_b = \sqrt{Z_b^2 - R_b^2} \Rightarrow X_b = \sqrt{6,33^2 - 6,25^2} \Rightarrow X_b = j1,00\Omega$$

$$X_c = \sqrt{Z_c^2 - R_c^2} \Rightarrow X_c = \sqrt{6,34^2 - 6,27^2} \Rightarrow X_c = j0,94\Omega$$

Para simplificação dos cálculos, adota-se a média das reatâncias e resistências para representação do circuito unifilar. Assim, tem-se

$$R_s = \frac{R_a + R_b + R_c}{3} \Rightarrow R_s = \frac{6,20 + 6,25 + 6,27}{3} \Rightarrow R_s = 6,24\Omega$$

$$X_s = \frac{X_a + X_b + X_c}{3} \Rightarrow X_s = \frac{j1,06 + j1,00 + j0,94}{3} \Rightarrow X_s = j1,00\Omega$$

$$L_s = \frac{X_s}{2 * \pi * 60} \Rightarrow L_s = \frac{j1,00}{2 * \pi * 60} \Rightarrow L_s = 2,65mH$$

Lembrando que estes parâmetros são equivalentes totais ao primário e secundário. A partir das Equações 1.7 e 1.8 é possível encontrar as componentes do primário e secundário, separadamente.

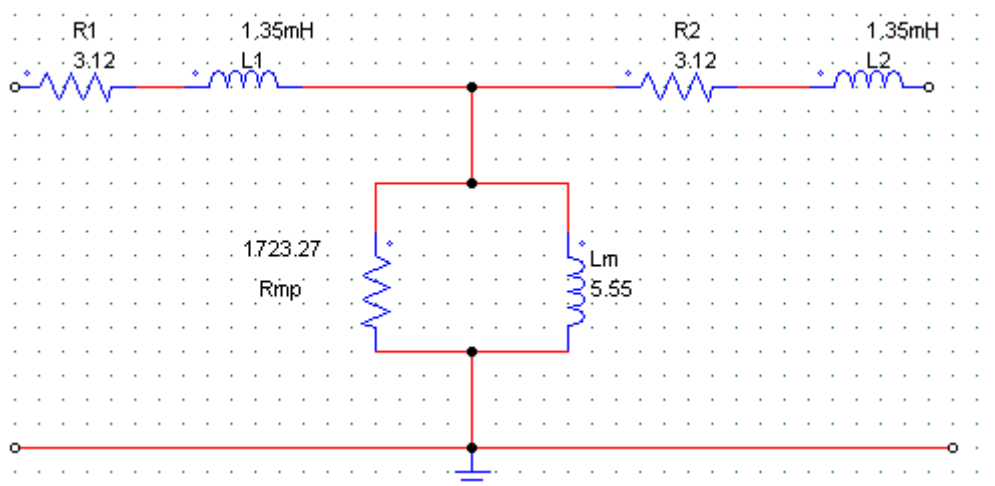
$$R_1 = R_2 = \frac{6,24}{2} = 3,12\Omega$$

$$X_1 = X_2 = \frac{j1,00}{2} = j0,50\Omega$$

$$L_1 = L_2 = \frac{2,65}{2} = 1,35mH$$

Com todos os parâmetros calculados, pode-se representar o transformador de acordo com o diagrama unifilar da Figura 13.

Figura 13 - Diagrama Unifilar (Estrela-Estrela)



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.4 Estudo de Caso - Ensaio em Curto com Inserção de Harmônicos – Ligação Delta-Delta

Na presente seção deste Trabalho de Conclusão de Curso tem-se a análise e determinação das impedâncias harmônicas do transformador sob avaliação. Assim sendo, apenas ensaios de curto-circuito serão realizados, haja vista que a determinação dos parâmetros atrelados ao ramo magnetizante não é representativa de impedâncias reais, além do que, pouco influenciarão para efeito de estudos de propagação de correntes harmônica por transformadores.

Para se proceder aos ensaios de curto-circuito foi imposta, por parte da fonte controlada, tensões trifásicas distorcidas, conforme destacado na Tabela 4 a seguir.

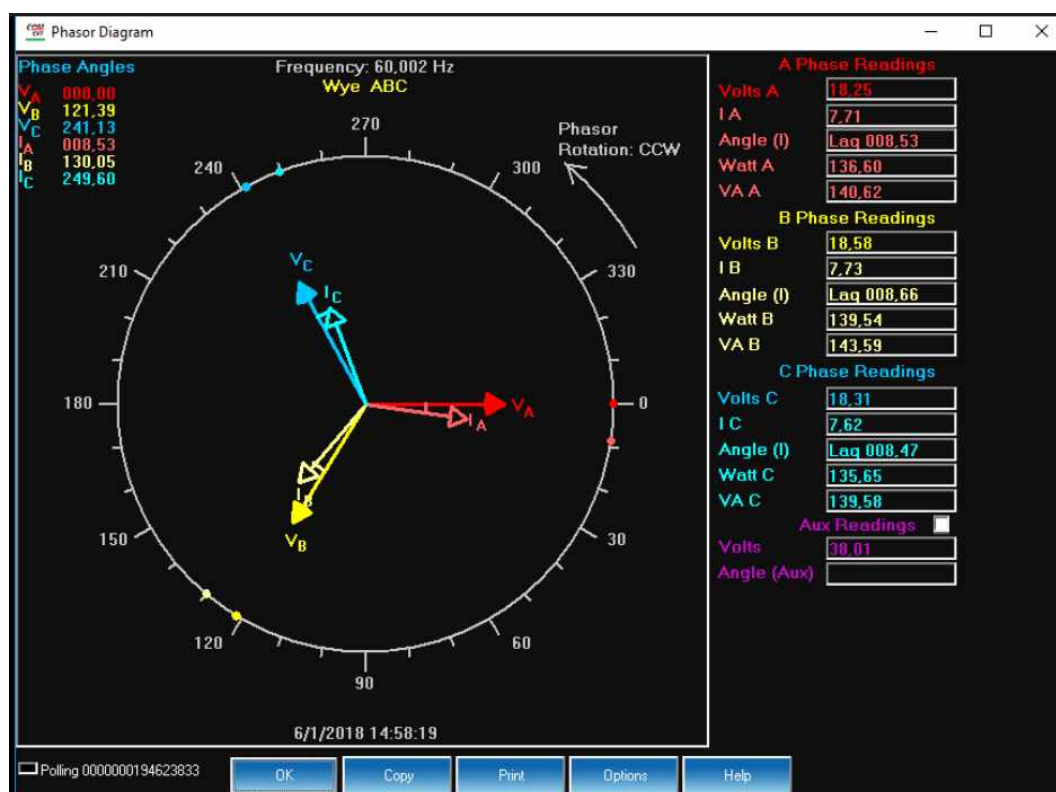
Tabela 4 - Distribuição das Ordens Harmônicas

h	Tensão (V)
1	100%
2	5%
3	5%
4	5%
5	5%
6	5%
7	5%
8	5%
9	5%
10	5%
11	5%
12	5%
13	5%
14	5%
15	5%
16	5%
17	5%
18	5%
19	5%

Pode-se notar que fora inserida a mesma magnitude (5% da fundamental) harmônica em todas ordens consideradas. Ressalta-se que neste estudo foi contemplado todas ordens harmônicas até a 19ª harmônica. A tensão fundamental imposta, conforme estabelecido na metodologia de ensaio de curto-circuito, é aquela em que se atinge a corrente nominal do transformador, neste caso, considerando a corrente fundamental e as contribuições das componentes harmônicas sobrepostas.

De forma semelhante ao diagrama fasorial referenciado na Figura 7, na Figura 14 a característica indutiva do transformador é referenciada, onde se predomina a reatância representativa do fluxo de dispersão.

Figura 14 - Diagrama Fasorial do Ensaio em Curto com Harmônico

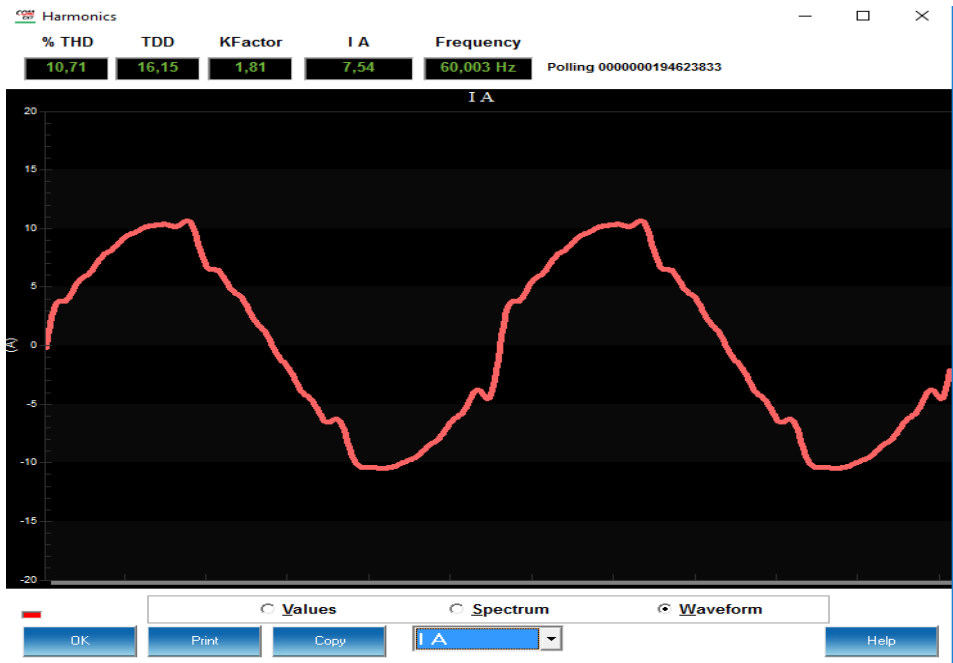


Fonte: Elaborada pelo autor.

Devido as inserções de componentes harmônicas impostas pela fonte controladora, é esperado que a forma de onda de corrente se apresente distorcida, como representado na Figura 15. Na figura 16, tem-se a onda da tensão imposta pela onda controladora



Figura 15 - Sinal de Corrente Distorcido



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 16 - Sinal de Tensão Distorcido



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nos Gráficos 1 e 2, abaixo, tem-se os espectros de harmônico para corrente e tensão. Pode-se perceber que não se propaga nas linhas do transformador em Delta, correntes harmônicas múltiplas de 3. Fato este devido à falta de conexão ao neutro deste sistema, e assim, não possuir caminho para componentes de sequência 0.

Gráfico 1 - Espectro Harmônico de Corrente

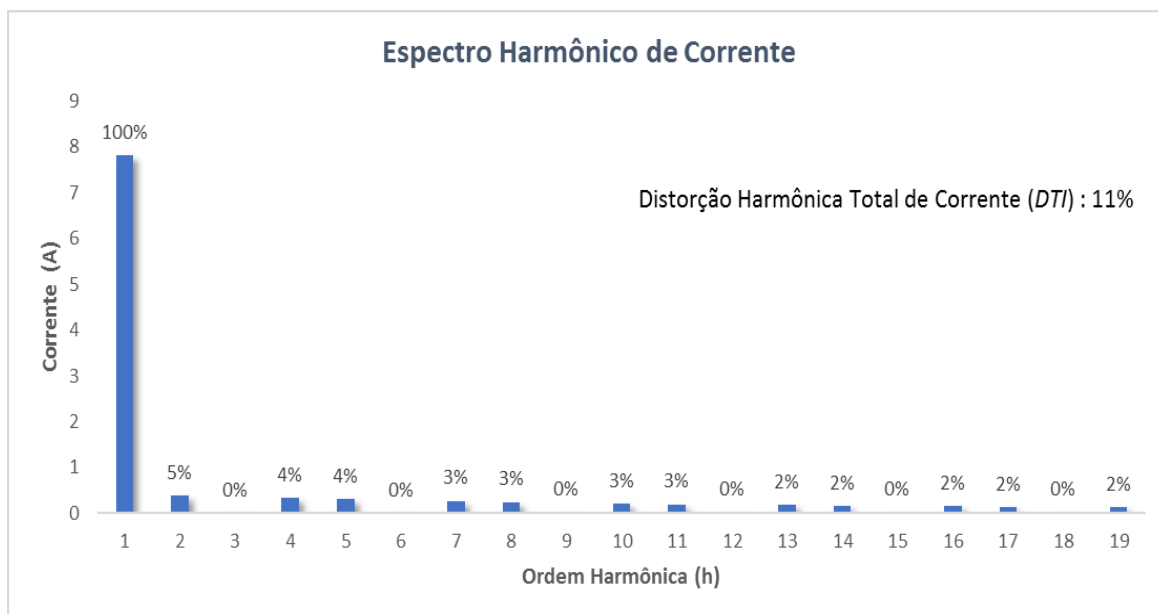
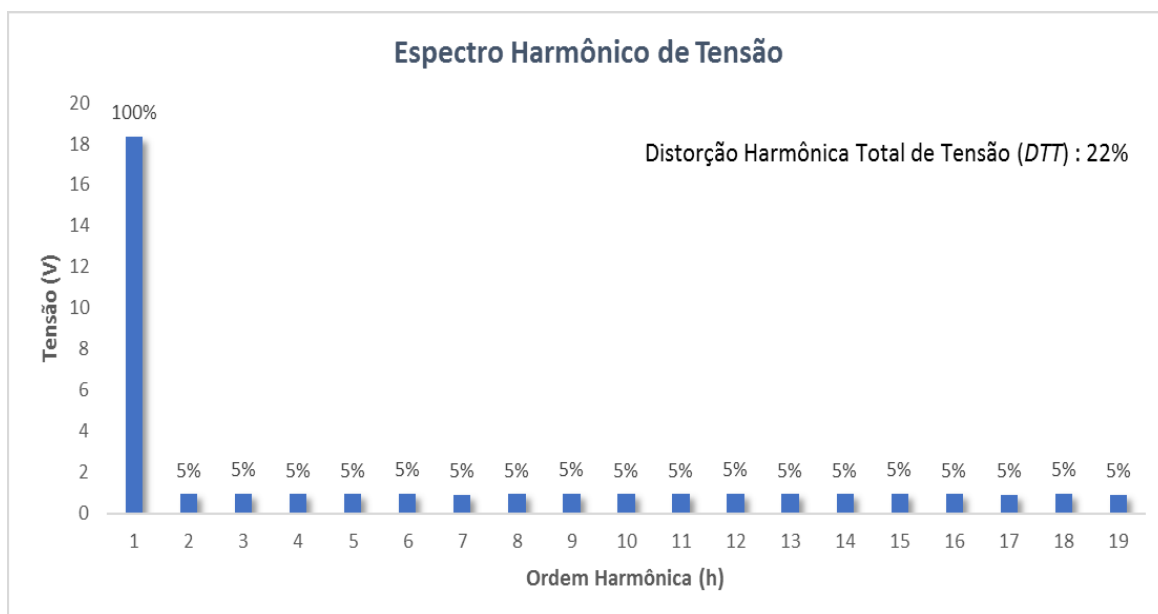


Gráfico 2 - Espectro Harmônico de Tensão



Abaixo, tem-se a tabela com o cálculo das impedâncias harmônicas, obtidas a partir da relação tensão/corrente de cada ordem providas do qualímetro Nexus 1500. Foi realizado um ajuste dos ângulos de cada ordem harmônica pois eles estavam referenciados a tensão/corrente fundamental. Desta forma, o ângulo de cada ordem foi

multiplicado pela sua ordem “h”. Tal ajuste pode ser visto na coluna “Adequações” nas Tabelas 5, 6, 7.

Tabela 5 - Impedâncias Harmônicas (Fase A)

	Nexus 1500		Adequações		Nexus 1500		Adequações		Cálculos				
	Ia		Ia		Va		Va		Za		Za		
h	Ia (%)	Ang_a	Ia (rms)	Ang_a	Va (%)	Ang_a	Va (rms)	Ang_a	Za (ohm)	Ang_a	Ra	Xa	La (mH)
1	100,00	0,00	7,84	-8,78	100,00	0,00	18,23	0,00	2,33	8,78	2,30	0,35	0,94
2	4,81	-6,14	0,38	-23,70	5,01	-5,45	0,91	-5,45	2,42	18,25	2,30	0,76	1,01
3	0,08	76,66	0,01	50,32	5,29	-10,24	0,96	-10,24	153,76	-60,56	75,57	-133,90	-
4	4,29	-11,04	0,34	-46,16	5,00	-13,38	0,91	-13,38	2,71	32,78	2,28	1,47	0,97
5	3,95	-12,26	0,31	-56,16	5,06	-16,46	0,92	-16,46	2,98	39,70	2,29	1,90	1,01
6	0,15	73,63	0,01	20,95	5,29	-21,13	0,96	-21,13	82,00	-42,08	60,86	-54,96	-
7	3,41	-11,73	0,27	-73,19	4,98	-24,49	0,91	-24,49	3,40	48,70	2,24	2,55	0,97
8	3,11	-10,41	0,24	-80,65	5,02	-27,89	0,92	-27,89	3,75	52,76	2,27	2,99	0,99
9	0,19	77,78	0,01	-1,24	5,29	-32,14	0,96	-32,14	64,74	-30,90	55,55	-33,25	-
10	2,72	-6,43	0,21	-94,23	5,02	-35,04	0,92	-35,04	4,29	59,19	2,20	3,69	0,98
11	2,50	-3,53	0,20	-100,11	5,00	-38,61	0,91	-38,61	4,65	61,50	2,22	4,09	0,99
12	0,21	85,44	0,02	-19,92	5,28	-42,88	0,96	-42,88	58,46	-22,96	53,83	-22,81	-
13	2,22	2,34	0,17	-111,80	5,00	-45,81	0,91	-45,81	5,24	65,99	2,13	4,78	0,98
14	2,06	6,16	0,16	-116,76	5,01	-49,39	0,91	-49,39	5,66	67,37	2,18	5,22	0,99
15	0,22	97,05	0,02	-34,65	5,26	-53,74	0,96	-53,74	55,59	-19,09	52,54	-18,18	-
16	1,86	13,24	0,15	-127,24	5,00	-56,51	0,91	-56,51	6,25	70,73	2,06	5,90	0,98
17	1,73	17,53	0,14	-131,73	4,99	-60,07	0,91	-60,07	6,71	71,66	2,11	6,37	0,99
18	0,23	108,96	0,02	-49,08	5,27	-64,52	0,96	-64,52	53,28	-15,44	51,36	-14,18	-
19	1,59	25,27	0,12	-141,55	4,98	-67,19	0,91	-67,19	7,28	74,36	1,96	7,01	0,98

Tabela 6 - Impedâncias Harmônicas (Fase B)

	Nexus 1500		Adequações		Nexus 1500		Adequações		Cálculos				
	Ib		Ib		Vb		Vb		Zb		Zb		
h	Ib (%)	Ang_b	Ib (rms)	Ang_b	Vb (%)	Ang_b	Vb (rms)	Ang_b	Zb (ohm)	Ang_b	Rb	Xb	La (mH)
1	100,00	0,00	7,86	-129,81	100,00	0,00	18,58	-121,00	2,36	8,81	2,34	0,36	0,96
2	4,80	-4,54	0,38	-264,16	5,01	-5,53	0,93	-247,53	2,47	16,63	2,36	0,71	0,94
3	0,06	-136,07	0,00	-525,50	5,19	-9,05	0,96	-372,05	204,47	153,45	-182,91	91,40	-
4	4,30	-9,25	0,34	-528,49	4,97	-13,45	0,92	-497,45	2,73	31,04	2,34	1,41	0,93
5	3,93	-9,59	0,31	-658,64	4,96	-17,52	0,92	-622,52	2,98	36,12	2,41	1,76	0,93
6	0,09	-95,86	0,01	-874,72	5,18	-19,96	0,96	-745,96	136,05	128,76	-85,18	106,09	-
7	3,46	-8,13	0,27	-916,80	4,95	-24,04	0,92	-871,04	3,38	45,76	2,36	2,42	0,92
8	3,07	-6,55	0,24	-1045,03	4,96	-27,53	0,92	-995,53	3,82	49,50	2,48	2,90	0,96
9	0,11	-91,73	0,01	-1260,02	5,17	-30,44	0,96	-1119,44	111,10	140,58	-85,83	70,55	-
10	2,78	-1,11	0,22	-1299,21	4,93	-34,36	0,92	-1244,36	4,19	54,85	2,41	3,43	0,91
11	2,44	1,59	0,19	-1426,32	4,94	-37,89	0,92	-1368,89	4,79	57,43	2,58	4,03	0,97
12	0,11	-77,78	0,01	-1635,50	5,17	-40,63	0,96	-1492,63	111,10	142,87	-88,58	67,06	-
13	2,29	9,33	0,18	-1678,20	4,89	-44,65	0,91	-1617,65	5,05	60,55	2,48	4,40	0,90
14	1,99	12,60	0,16	-1804,74	4,94	-48,06	0,92	-1742,06	5,87	62,68	2,69	5,21	0,99
15	0,12	-68,04	0,01	-2015,19	5,15	-50,94	0,96	-1865,94	101,45	149,25	-87,19	51,87	-
16	1,94	21,85	0,15	-2055,11	4,88	-54,82	0,91	-1990,82	5,95	64,29	2,58	5,36	0,89
17	1,66	25,37	0,13	-2181,40	4,91	-58,40	0,91	-2115,40	6,99	66,00	2,84	6,39	1,00
18	0,12	-55,48	0,01	-2392,06	5,16	-61,19	0,96	-2239,19	101,65	152,87	-90,46	46,35	-
19	1,68	35,45	0,13	-2430,94	4,85	-65,24	0,90	-2364,24	6,82	66,70	2,70	6,27	0,88

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Tabela 7 - Impedâncias Harmônicas (Fase C)

h	Nexus 1500		Adequações		Nexus 1500		Adequações		Cálculos					
	Ic		Ic		Vc		Vc		Zc		Zc			
	Ic (%)	Ang_c	Ic (rms)	Ang_c	Vc (%)	Ang_c	Vc (rms)	Ang_c	Zc (ohm)	Ang_c	Rc	Xc	Lc (mH)	
1	100,00	0,00	7,75	111,17	100,00	0,00	18,30	119,81	2,36	8,64	2,33	0,35	0,94	
2	4,87	-5,00	0,38	217,34	4,99	-5,46	0,91	234,16	2,42	16,82	2,32	0,70	0,93	
3	0,08	-73,22	0,01	260,29	5,33	-9,62	0,98	349,81	157,32	89,52	1,32	157,32	-	
4	4,25	-9,97	0,33	434,71	5,00	-13,23	0,92	466,01	2,78	31,30	2,37	1,44	0,96	
5	4,08	-10,36	0,32	545,49	4,91	-16,86	0,90	582,19	2,84	36,70	2,28	1,70	0,90	
6	0,09	-90,85	0,01	576,17	5,26	-20,42	0,96	698,44	138,00	122,27	-73,68	116,69	-	
7	3,36	-9,84	0,26	768,35	5,01	-24,16	0,92	814,51	3,52	46,16	2,44	2,54	0,96	
8	3,27	-8,04	0,25	881,32	4,99	-27,53	0,91	930,95	3,60	49,63	2,33	2,75	0,91	
9	0,10	-89,35	0,01	911,18	5,25	-31,23	0,96	1047,06	123,97	135,88	-88,99	86,30	-	
10	2,65	-3,81	0,21	1107,89	4,99	-34,79	0,91	1163,31	4,45	55,42	2,52	3,66	0,97	
11	2,66	-0,60	0,21	1222,27	4,96	-38,28	0,91	1279,63	4,40	57,36	2,37	3,71	0,89	
12	0,11	-78,95	0,01	1255,09	5,26	-41,54	0,96	1396,18	112,91	141,09	-87,86	70,92	-	
13	2,15	5,59	0,17	1450,80	4,97	-45,38	0,91	1512,15	5,46	61,35	2,62	4,79	0,98	
14	2,22	9,71	0,17	1566,09	4,96	-48,76	0,91	1628,58	5,28	62,49	2,44	4,68	0,89	
15	0,11	-70,42	0,01	1597,13	5,23	-52,14	0,96	1745,01	112,27	147,88	-95,08	59,69	-	
16	1,78	16,99	0,14	1795,71	4,97	-55,85	0,91	1861,11	6,59	65,40	2,74	5,99	0,99	
17	1,89	21,75	0,15	1911,64	4,92	-59,27	0,90	1977,50	6,15	65,86	2,51	5,61	0,88	
18	0,10	-59,16	0,01	1941,90	5,25	-62,54	0,96	2094,04	123,97	152,14	-109,60	57,93	-	
19	1,51	29,64	0,12	2141,87	4,95	-66,45	0,91	2209,94	7,74	68,07	2,89	7,18	1,00	

Fonte: Elaborada pelo Autor.

A partir destes resultados obtidos, pode-se chegar às seguintes constatações:

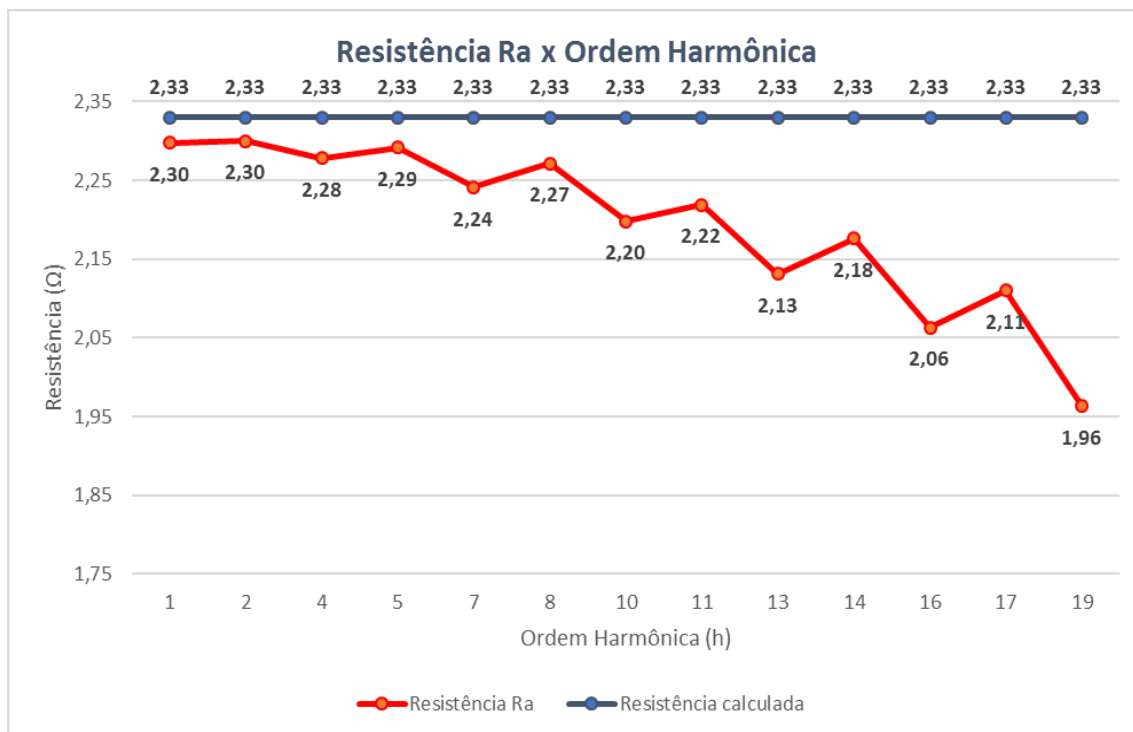
- Nas 3 fases (A, B e C) foram obtidos valores muito próximos no que tange às impedâncias encontradas;
- As impedâncias das ordens harmônicas múltipla de 3 foram, em geral, encontradas com magnitudes bem superiores quando comparadas às demais ordens. Este resultado já era esperado pois o transformador, por se tratar de conexão delta-delta, não apresenta caminho para a corrente harmônica de 3ª ordem equilibrada, a qual também é comumente conhecida como harmônica de sequência zero. As ordens múltiplas de 3 estão destacadas em laranja em cada fase;
- Com exceção das ordens múltiplas de 3, as resistências equivalentes das fases B e C tiveram um ligeiro aumento com o aumento das ordens harmônicas, devido ao Efeito Pelicular, onde ocorre um aumento das resistências em função do aumento de frequência.
- A fase A apresentou uma redução da resistência com o aumento de frequência, diferentemente das fases B e C.
- Com exceção das ordens múltiplas de 3, as indutâncias equivalentes estiveram em média, próximas a 0,98mH;
- Os valores ficaram próximos ao ensaio tradicional apresentado no Tópico 3.2, mostrando assim, a validade deste ensaio.

Nos Gráficos 3, 4 abaixo, pode-se observar a variação da resistência e indutância com a ordem harmônica para a fase A.

Percebe-se que a resistência do cobre encontrada a partir do ensaio em curto esteve-se próxima à encontrada pela relação tensão/corrente até a 7ª ordem. Ao todo, a

resistência apresentou um comportamento decrescente com o aumento da ordem harmônica.

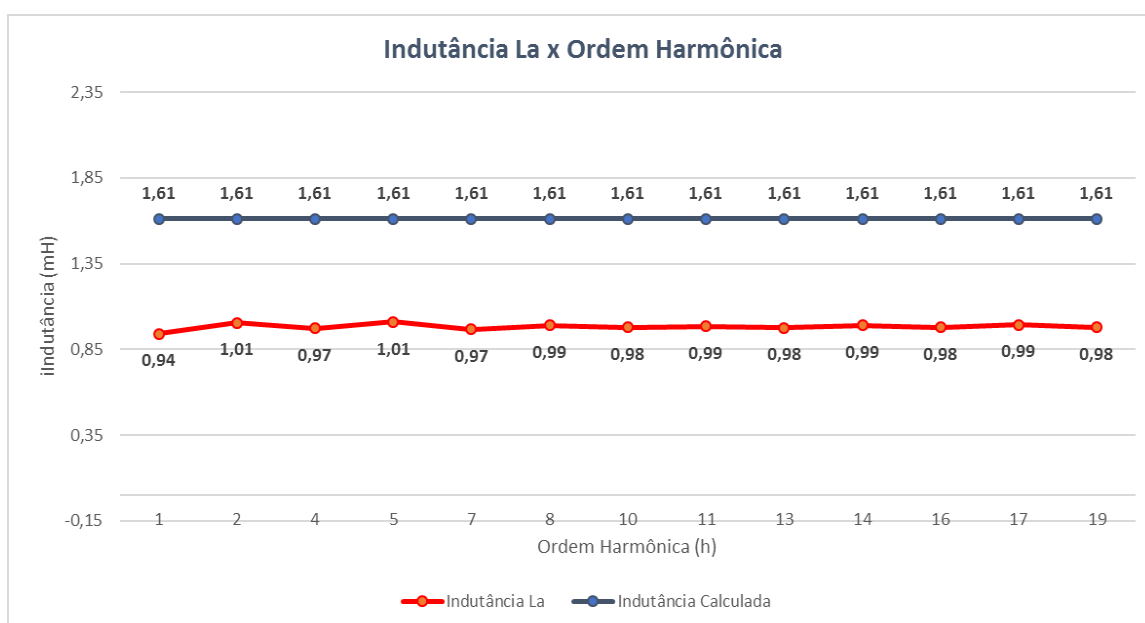
Gráfico 3 - Resistência  $R_a$  x Ordem Harmônica (Delta-Delta)



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Para a indutância, os valores se mantiveram constantes, com pouca variação com o aumento das ordens harmônicas, como mostra o Gráfico 4.

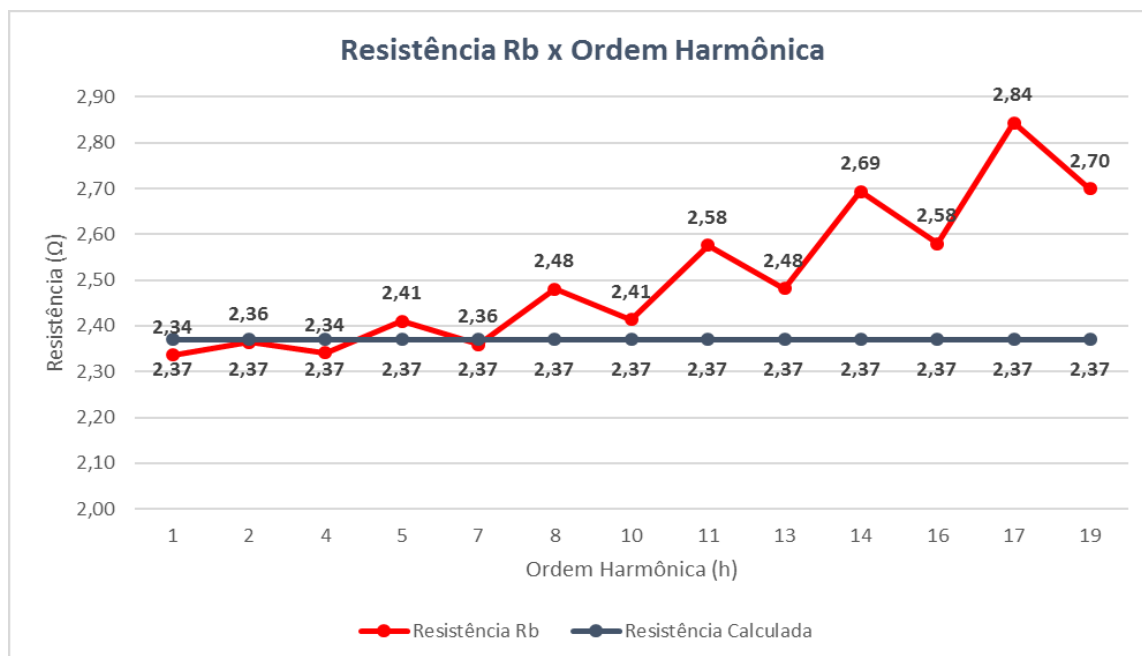
Gráfico 4 – Indutância  $L_a$  x Ordem Harmônica (Delta-Delta)



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Diferentemente da resistência analisada para a fase A, pelo Gráfico 5 pode-se observar que a resistência  $R_b$  apresentou uma característica crescente com o aumento da ordem harmônica. Para as ordens harmônicas de sequência negativa, o aumento da resistência se mostrou mais acentuado.

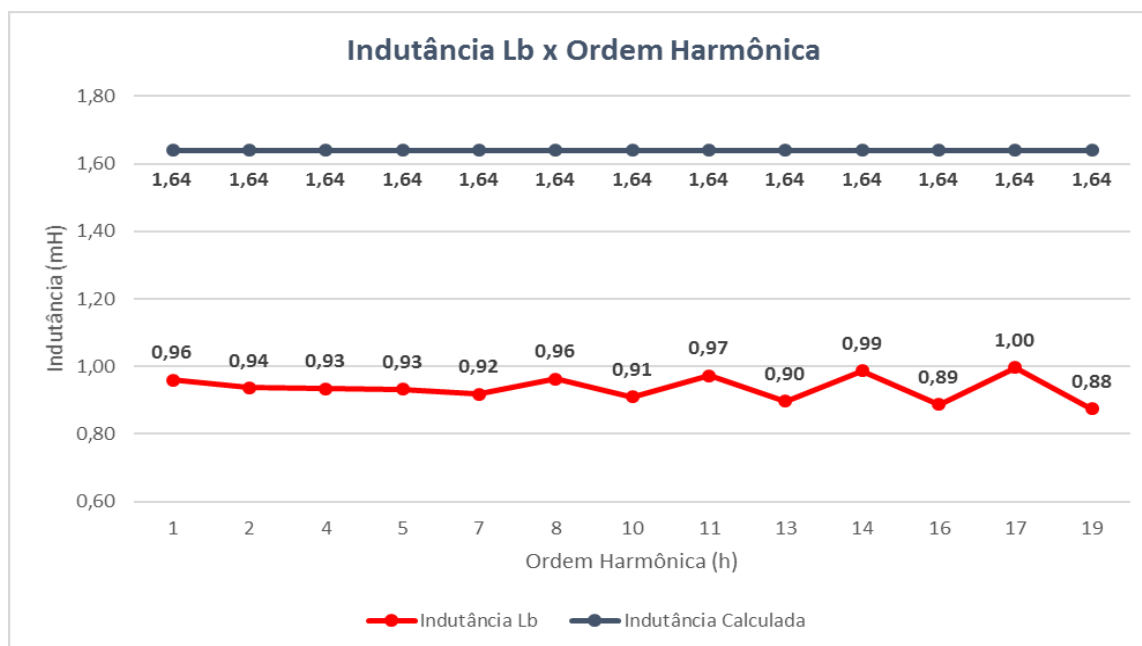
Gráfico 5 - Resistência  $R_b$  x Ordem Harmônica (Delta-Delta)



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Para a indutância, os valores se mantiveram constantes, com pouca variação com o aumento das ordens harmônicas como mostra o Gráfico 6.

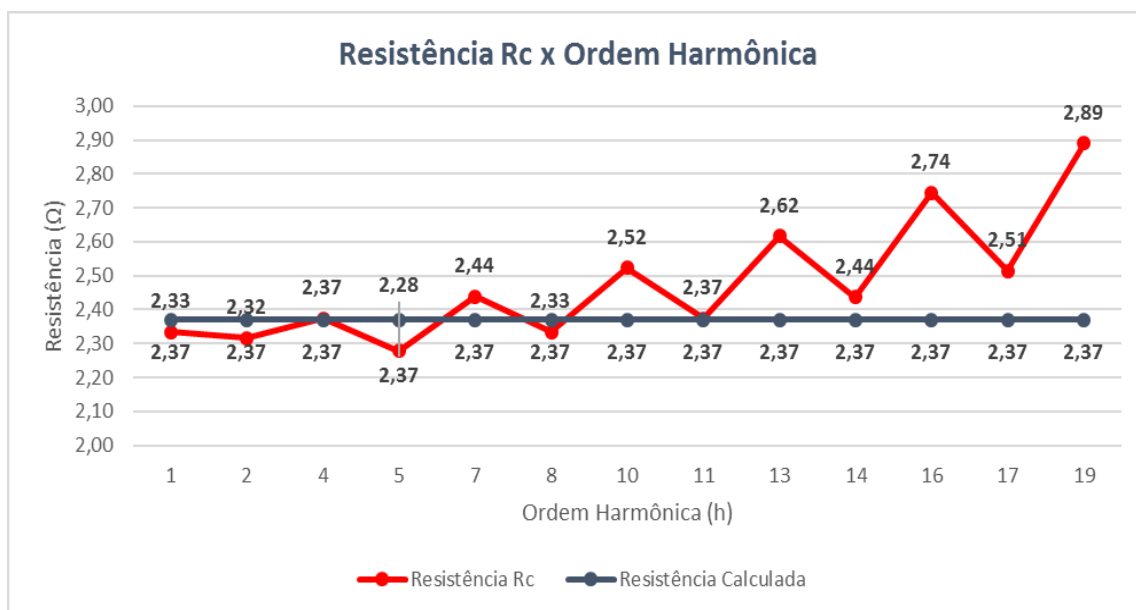
Gráfico 6 - Indutância  $L_b$  x Ordem Harmônica (Delta-Delta)



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Semelhantemente a resistência analisada para a fase B, pelo Gráfico 7 pode-se observar que a resistência  $R_c$  apresentou uma característica crescente com o aumento da ordem harmônica. Até a 8ª ordem, os valores obtidos do ensaio em curto e da relação tensão/corrente estiveram próximos. Para as ordens harmônicas de sequência negativa, o aumento da resistência se mostrou mais acentuado.

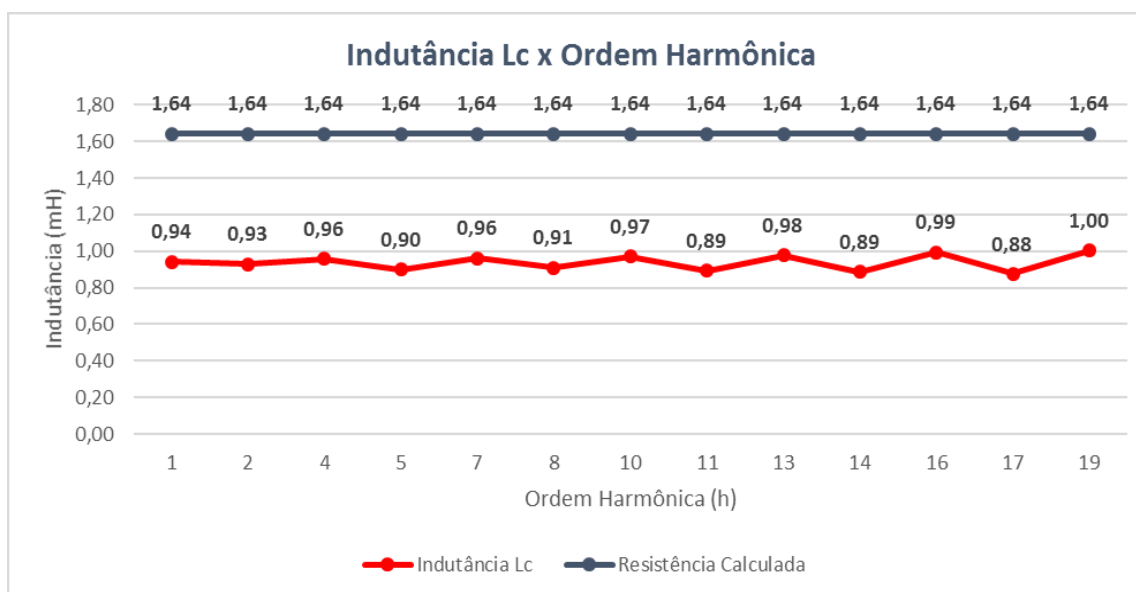
Gráfico 7 - Resistência  $R_c$  x Ordem Harmônica (Delta-Delta)



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Para a indutância, os valores se mantiveram constantes, com pouca variação com o aumento das ordens harmônicas como mostra o Gráfico 6.

Gráfico 8 - Indutância  $L_c$  x Ordem Harmônica (Delta-Delta)



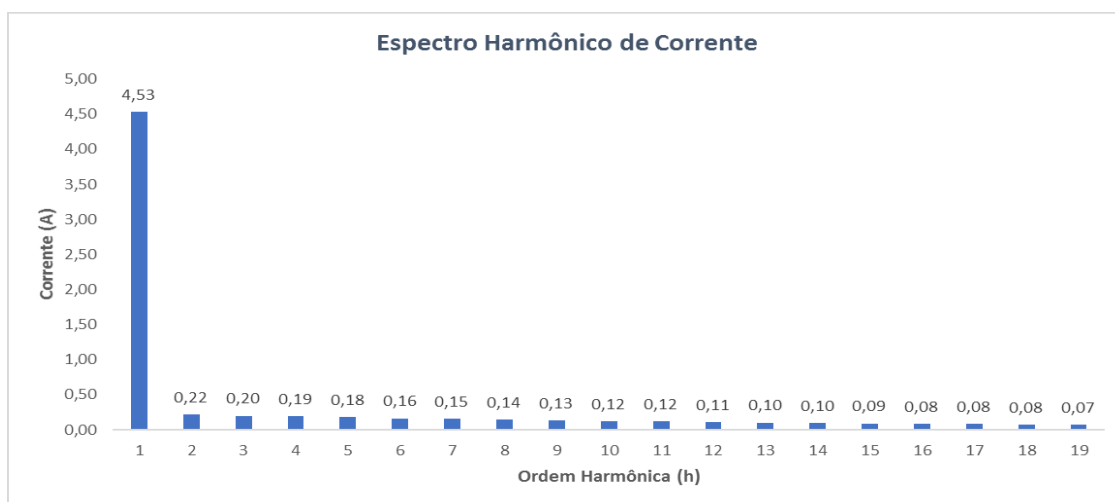
Fonte: Elaborada pelo Autor.

### 3.5 Estudo de Caso - Ensaio em Curto com Inserção de Harmônicos – Ligação Estrela-Estrela

Da mesma forma que o estudo de caso apresentado na Seção 3.4 desta monografia, foi realizado a análise para determinação das impedâncias harmônicas, agora com o transformador com a ligação estrela-estrela, estando o neutro conectado com o neutro da fonte controladora. As mesmas ordens harmônicas apresentadas na seção anterior foram impostas pela fonte controladora.

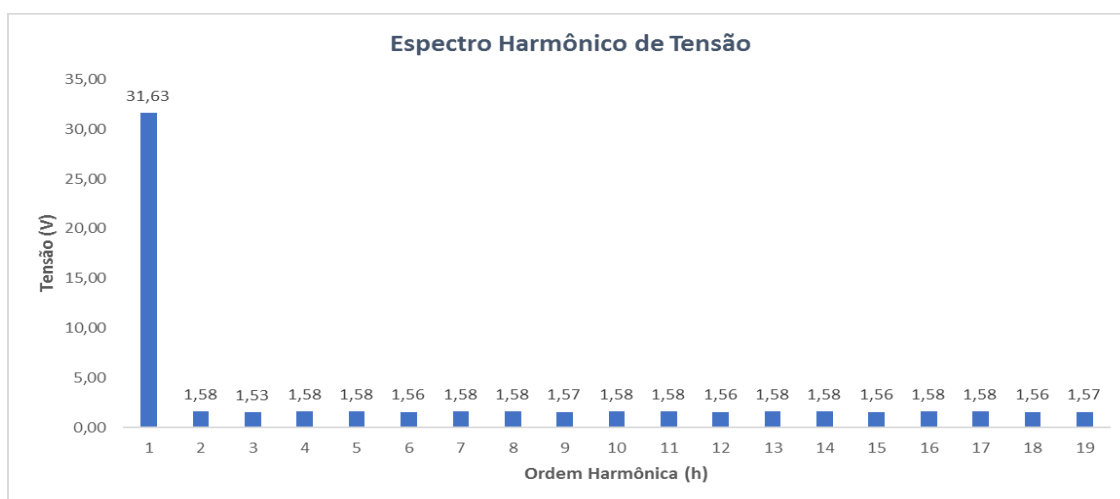
Desta forma, nos Gráficos 9 e 10, abaixo, tem-se os espectros harmônicos de corrente e tensão respectivamente.

Gráfico 9 - Espectro harmônico de Corrente



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Gráfico 10 - Espectro Harmônico de Tensão

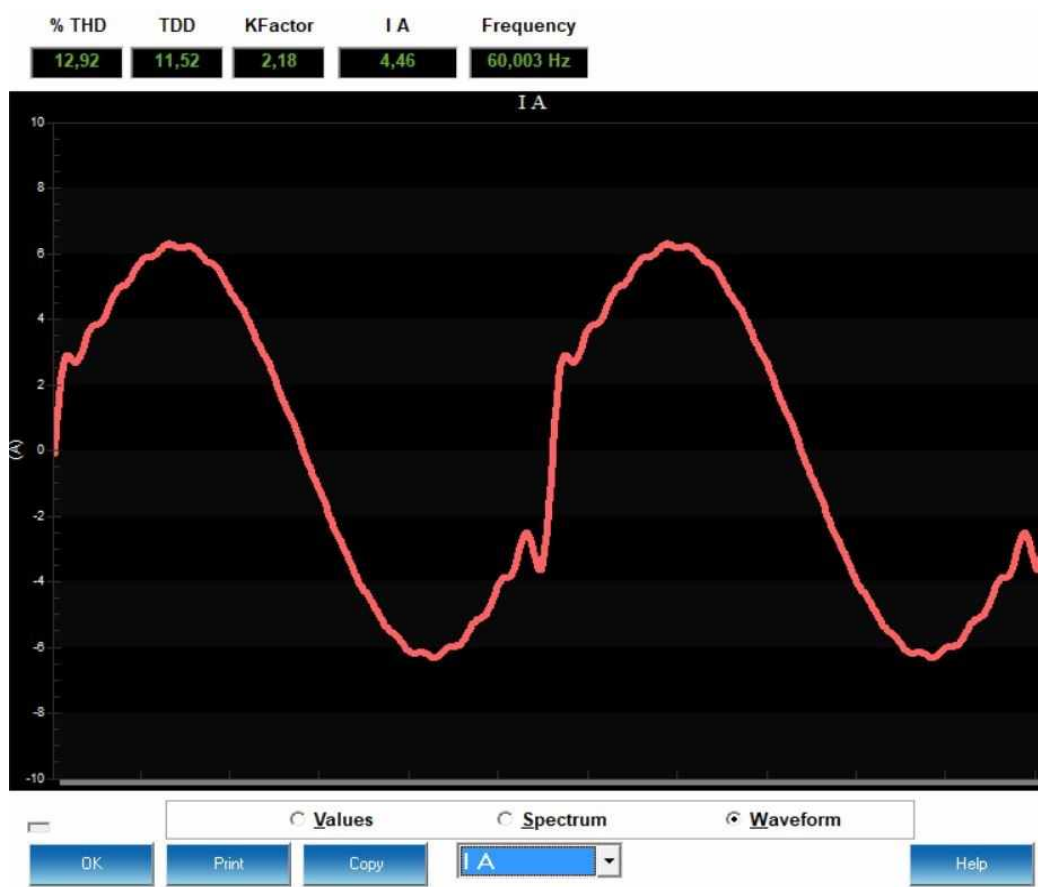


Fonte: Elaborada pelo Autor.



Devido as inserções de componentes harmônicas impostas pela fonte controladora, é esperado que a forma de onda de corrente se apresente distorcida, como representado na Figura 17.

Figura 17 - Forma de Onda de Corrente



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Abaixo, tem-se a tabela com o cálculo das impedâncias harmônicas, obtidas a partir da relação tensão/corrente de cada ordem providas do qualímetro Nexus 1500. Foi realizado um ajuste dos ângulos de cada ordem harmônica pois eles estavam referenciados a tensão/corrente fundamental. Desta forma, o ângulo de cada ordem foi multiplicado pela sua ordem “h”. Tal ajuste pode ser visto na coluna “Adequações” nas Tabelas 8, 9, 10.

Tabela 8 - Impedâncias Harmônicas (Fase A)

	Nexus 1500		Adequações		Nexus 1500		Adequações		Cálculos					
	Ia		Ia		Va		Va		Za		Za			
h	Ia (%)	Ang_a	Ia (rms)	Ang_a	Va (%)	Ang_a	Va (rms)	Ang_a	Za (ohm)	Ang_a	Ra	Xa	La (mH)	
1	100,00	0,00	4,53	-8,94	100,00	0,00	31,63	0,00	6,98	8,94	6,90	1,09	2,88	
2	4,83	-4,78	0,22	-22,66	5,00	-5,63	1,58	-5,63	7,23	17,03	6,91	2,12	2,81	
3	4,37	-7,90	0,20	-34,72	4,85	-9,11	1,53	-9,11	7,75	25,61	6,99	3,35	2,96	
4	4,30	-9,94	0,19	-45,70	5,00	-13,88	1,58	-13,88	8,12	31,82	6,90	4,28	2,84	
5	4,00	-10,38	0,18	-55,08	4,99	-17,65	1,58	-17,65	8,71	37,43	6,92	5,29	2,81	
6	3,56	-9,46	0,16	-63,10	4,92	-21,15	1,56	-21,15	9,65	41,95	7,18	6,45	2,85	
7	3,41	-9,77	0,15	-72,35	4,98	-25,47	1,58	-25,47	10,20	46,88	6,97	7,44	2,82	
8	3,17	-7,87	0,14	-79,39	5,01	-28,77	1,58	-28,77	11,04	50,62	7,00	8,53	2,83	
9	2,86	-4,84	0,13	-85,30	4,95	-32,34	1,57	-32,34	12,08	52,96	7,28	9,65	2,84	
10	2,72	-3,42	0,12	-92,82	5,01	-36,21	1,58	-36,21	12,86	56,61	7,08	10,74	2,85	
11	2,56	-0,29	0,12	-98,63	5,00	-39,70	1,58	-39,70	13,64	58,93	7,04	11,68	2,82	
12	2,33	3,83	0,11	-103,45	4,93	-43,40	1,56	-43,40	14,77	60,05	7,38	12,80	2,83	
13	2,24	6,18	0,10	-110,04	4,99	-47,22	1,58	-47,22	15,55	62,82	7,11	13,84	2,82	
14	2,12	10,14	0,10	-115,02	5,00	-50,84	1,58	-50,84	16,47	64,18	7,17	14,82	2,81	
15	1,95	14,90	0,09	-119,20	4,92	-54,57	1,56	-54,57	17,62	64,63	7,55	15,92	2,81	
16	1,87	17,93	0,08	-125,11	4,99	-58,20	1,58	-58,20	18,63	66,91	7,31	17,14	2,84	
17	1,78	22,20	0,08	-129,78	4,99	-62,02	1,58	-62,02	19,57	67,76	7,41	18,12	2,83	
18	1,67	27,19	0,08	-133,73	4,93	-65,53	1,56	-65,53	20,61	68,20	7,65	19,14	2,82	
19	1,60	30,81	0,07	-139,05	4,97	-69,34	1,57	-69,34	21,69	69,71	7,52	20,34	2,84	

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Tabela 9 - Impedância Harmônica (Fase B)

	Nexus 1500		Adequações		Nexus 1500		Adequações		Cálculos					
	Ib		Ib		Vb		Vb		Zb		Zb			
h	Ib (%)	Ang_b	Ib (rms)	Ang_b	Vb (%)	Ang_b	Vb (rms)	Ang_b	Zb (ohm)	Ang_b	Rb	Xb	Lb (mH)	
1	100,00	0,00	4,51	112,17	100,00	0,00	31,65	120,91	7,02	8,74	6,94	1,07	2,83	
2	4,83	-5,23	0,22	219,11	5,00	-5,46	1,58	236,36	7,26	17,25	6,94	2,15	2,86	
3	4,30	-7,22	0,19	329,29	4,86	-9,19	1,54	353,54	7,93	24,25	7,23	3,26	2,88	
4	4,30	-10,17	0,19	438,51	5,00	-13,35	1,58	470,29	8,16	31,78	6,94	4,30	2,85	
5	4,02	-10,77	0,18	550,08	5,00	-17,06	1,58	587,49	8,73	37,41	6,93	5,30	2,81	
6	3,56	-9,36	0,16	663,66	4,93	-20,33	1,56	705,13	9,72	41,47	7,28	6,44	2,85	
7	3,43	-10,29	0,15	774,90	4,99	-24,36	1,58	822,01	10,21	47,11	6,95	7,48	2,83	
8	3,19	-8,72	0,14	888,64	4,99	-27,94	1,58	939,34	10,98	50,70	6,95	8,49	2,82	
9	2,88	-5,09	0,13	1004,44	4,95	-31,07	1,57	1057,12	12,06	52,68	7,31	9,59	2,83	
10	2,75	-4,41	0,12	1117,29	5,00	-35,14	1,58	1173,96	12,76	56,67	7,01	10,66	2,83	
11	2,58	-1,56	0,12	1232,31	5,00	-38,82	1,58	1291,19	13,60	58,88	7,03	11,64	2,81	
12	2,36	3,04	0,11	1349,08	4,95	-41,87	1,57	1409,05	14,72	59,97	7,37	12,74	2,82	
13	2,26	4,77	0,10	1462,98	5,00	-45,96	1,58	1525,87	15,53	62,89	7,08	13,82	2,82	
14	2,13	8,39	0,10	1578,77	4,99	-49,43	1,58	1643,31	16,44	64,54	7,07	14,84	2,81	
15	1,98	13,63	0,09	1696,18	4,93	-52,61	1,56	1761,04	17,47	64,86	7,42	15,82	2,80	
16	1,90	16,06	0,09	1810,78	5,00	-56,58	1,58	1877,98	18,47	67,20	7,16	17,02	2,82	
17	1,80	20,03	0,08	1926,92	4,97	-59,95	1,57	1995,52	19,38	68,60	7,07	18,04	2,81	
18	1,69	25,39	0,08	2044,45	4,94	-63,29	1,56	2113,09	20,51	68,64	7,47	19,10	2,82	
19	1,63	28,36	0,07	2159,59	4,97	-67,27	1,57	2230,02	21,40	70,43	7,17	20,16	2,81	

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Tabela 10 - Impedância Harmônica (Fase C)

	Nexus 1500		Adequações		Nexus 1500		Adequações		Cálculos					
	Ic		Ic		Vc		Vc		Zc		Zc			
h	Ic (%)	Ang_c	Ic (rms)	Ang_c	Vc (%)	Ang_c	Vc (rms)	Ang_c	Zc (ohm)	Ang_c	Rc	Xc	Lc (mH)	
1	100	0	4,51	-128,06	100	0	31,70	-119,56	7,03	8,50	6,95	1,04	2,76	
2	4,83	-6,04	0,22	-262,16	5	-5,68	1,59	-244,80	7,28	17,36	6,94	2,17	2,88	
3	4,31	-8,53	0,19	-392,71	4,86	-8,95	1,54	-367,63	7,93	25,08	7,18	3,36	2,97	
4	4,29	-10,89	0,19	-523,13	5	-13,31	1,59	-491,55	8,19	31,58	6,98	4,29	2,84	
5	3,96	-12,38	0,18	-652,68	4,99	-17,25	1,58	-615,05	8,86	37,63	7,01	5,41	2,87	
6	3,52	-11,28	0,16	-779,64	4,93	-20,41	1,56	-737,77	9,84	41,87	7,33	6,57	2,90	
7	3,4	-11,71	0,15	-908,13	5,02	-24,46	1,59	-861,38	10,38	46,75	7,11	7,56	2,86	
8	3,13	-10,71	0,14	-1035,19	5,01	-27,99	1,59	-984,47	11,25	50,72	7,12	8,71	2,89	
9	2,83	-7,35	0,13	-1159,89	4,93	-31,16	1,56	-1107,20	12,24	52,69	7,42	9,74	2,87	
10	2,71	-6,32	0,12	-1286,92	5	-35,03	1,59	-1230,63	12,97	56,29	7,20	10,79	2,86	
11	2,52	-3,83	0,11	-1412,49	4,99	-38,69	1,58	-1353,85	13,92	58,64	7,24	11,88	2,87	
12	2,31	0,54	0,10	-1536,18	4,95	-41,91	1,57	-1476,63	15,06	59,55	7,63	12,98	2,87	
13	2,22	2,57	0,10	-1662,21	4,98	-45,79	1,58	-1600,07	15,77	62,14	7,37	13,94	2,84	
14	2,08	5,84	0,09	-1787,00	4,99	-49,33	1,58	-1723,17	16,86	63,83	7,44	15,13	2,87	
15	1,93	10,75	0,09	-1910,15	4,93	-52,68	1,56	-1846,08	17,95	64,07	7,85	16,15	2,86	
16	1,86	13,39	0,08	-2035,57	4,98	-56,36	1,58	-1969,32	18,82	66,25	7,58	17,23	2,86	
17	1,76	17,15	0,08	-2159,87	4,96	-60,05	1,57	-2092,57	19,81	67,30	7,64	18,27	2,85	
18	1,65	22,34	0,07	-2282,74	4,93	-63,32	1,56	-2215,40	21,00	67,34	8,09	19,38	2,86	
19	1,59	25,44	0,07	-2407,70	4,97	-67,1	1,58	-2338,74	21,97	68,96	7,89	20,51	2,86	

Fonte: Elaborada pelo Autor.

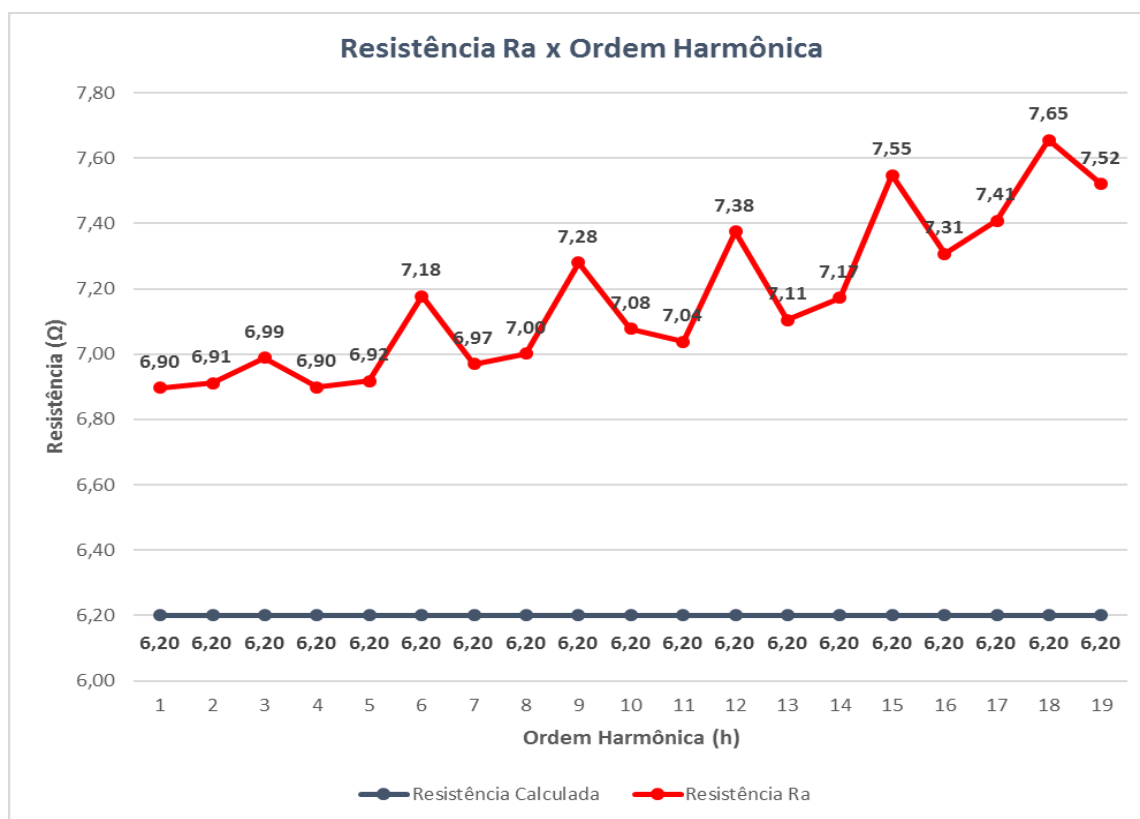
A partir destes resultados obtidos, pode-se chegar às seguintes constatações:

- Nas 3 fases (A, B e C) foram obtidos valores muito próximos no que tange às impedâncias encontradas;
- As resistências apresentaram um crescimento com o aumento das ordens harmônicas. Fenômeno este denominado “Efeito Skin” ou “Efeito Pelicular”, que ocorre quando transformadores são submetidos a altas frequências e correntes parasitas surgem aumentando as perdas jaulicas, e consequentemente, o efeito resistivo.
- As indutâncias tiveram pouca variação com o aumento das ordens harmônicas, estando em média, próximo a 2,85mH
- Os valores ficaram próximos ao ensaio tradicional apresentado no Tópico 3.3, mostrando assim, a validade deste ensaio.

Nos Gráficos 11, 12 abaixo, pode-se observar a variação da resistência e indutância com a ordem harmônica para a fase A.

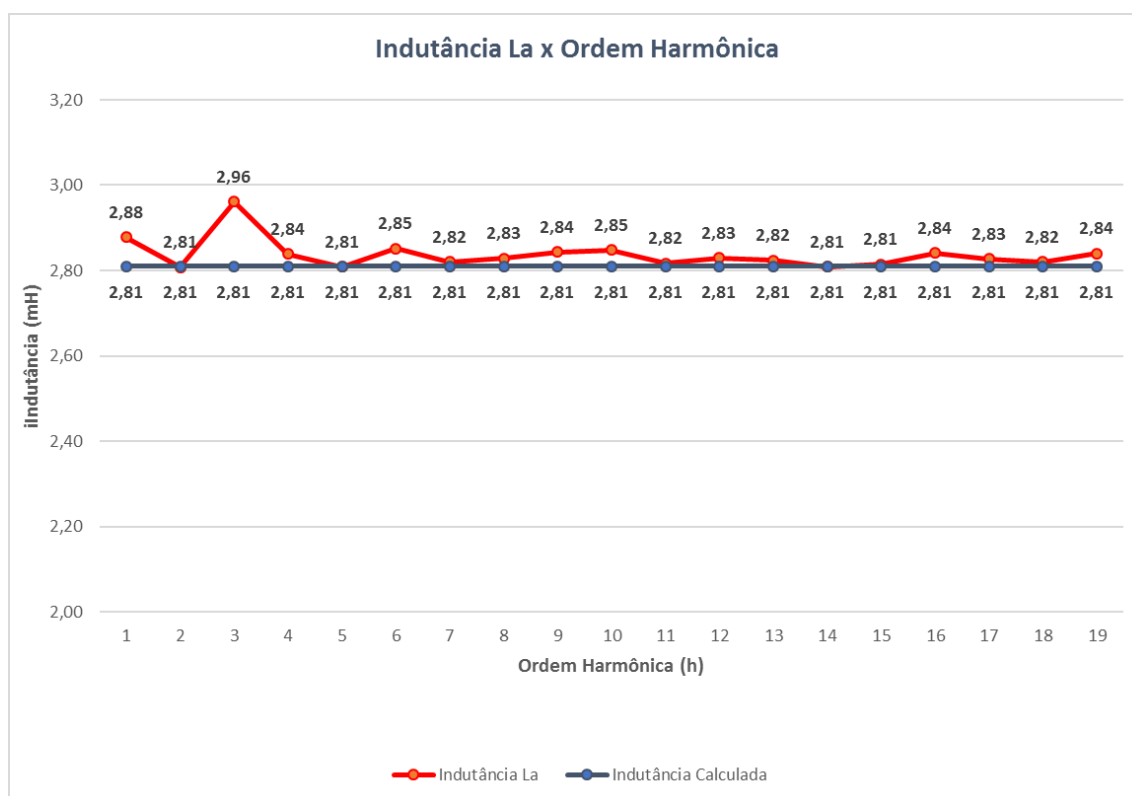
Percebe-se que a resistência encontrada a partir da relação tensão/corrente apresentou um crescimento conforme aumento das ordens harmônicas. Para as ordens múltiplas de 3 (sequência 0), as resistências apresentaram um valor mais acentuado, devido a componente negativa estar presente no sistema e aumentar o Efeito Pelicular.

Gráfico 11 - Resistência  $R_a$  x Ordem Harmônica (Estrela-Estrela)



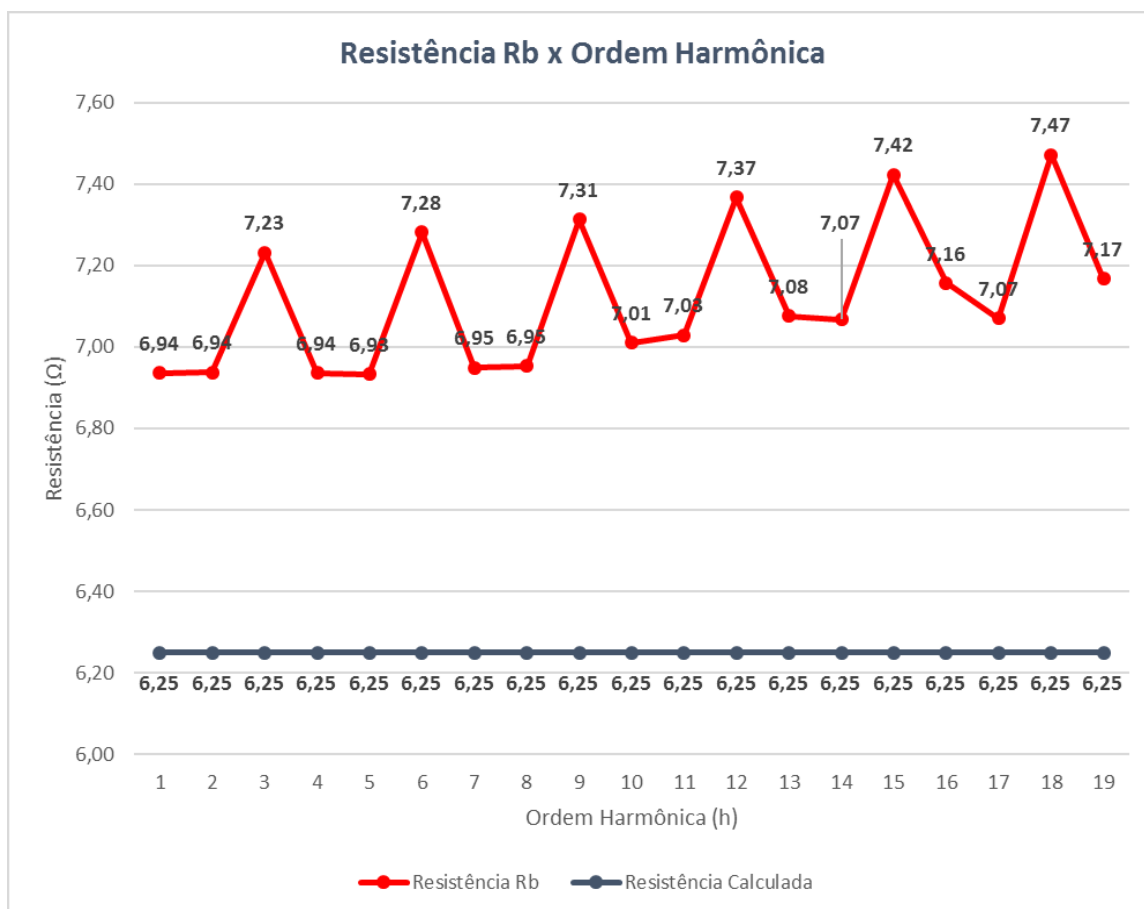
Para a indutância, os valores tiveram poucas variações entre as ordens harmônicas e esteve-se bem próxima do valor encontrado., conforme o Gráfico 12.

Gráfico 12 - Indutância La x Ordem Harmônica (Estrela-Estrela)



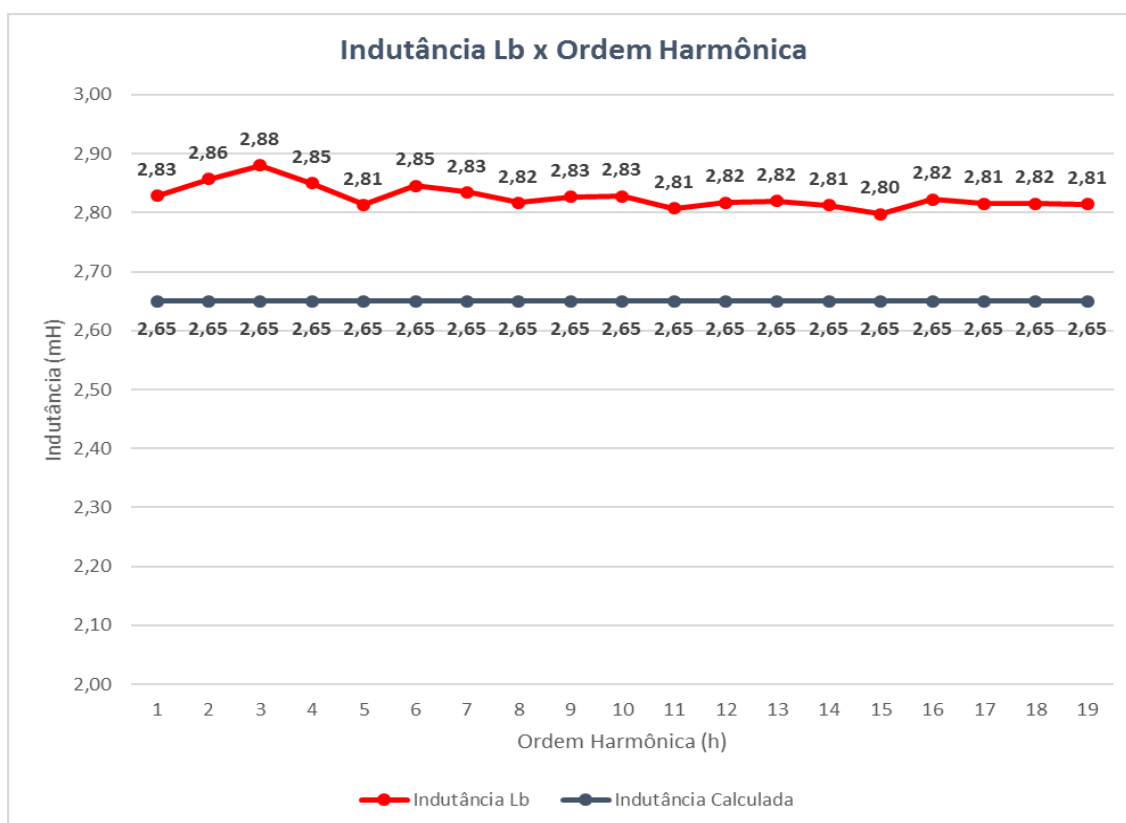
Semelhantemente a resistência analisada para a fase A, pelo Gráfico 13 pode-se observar que a resistência Rb apresentou uma característica crescente com o aumento da ordem harmônica. Para ordens harmônicas múltiplas de 3, o Efeito Pelicular ficou mais acentuado, aumentando assim, o valor da resistência

Gráfico 13 - Resistência Rb x Ordem Harmônica (Estrela-Estrela)



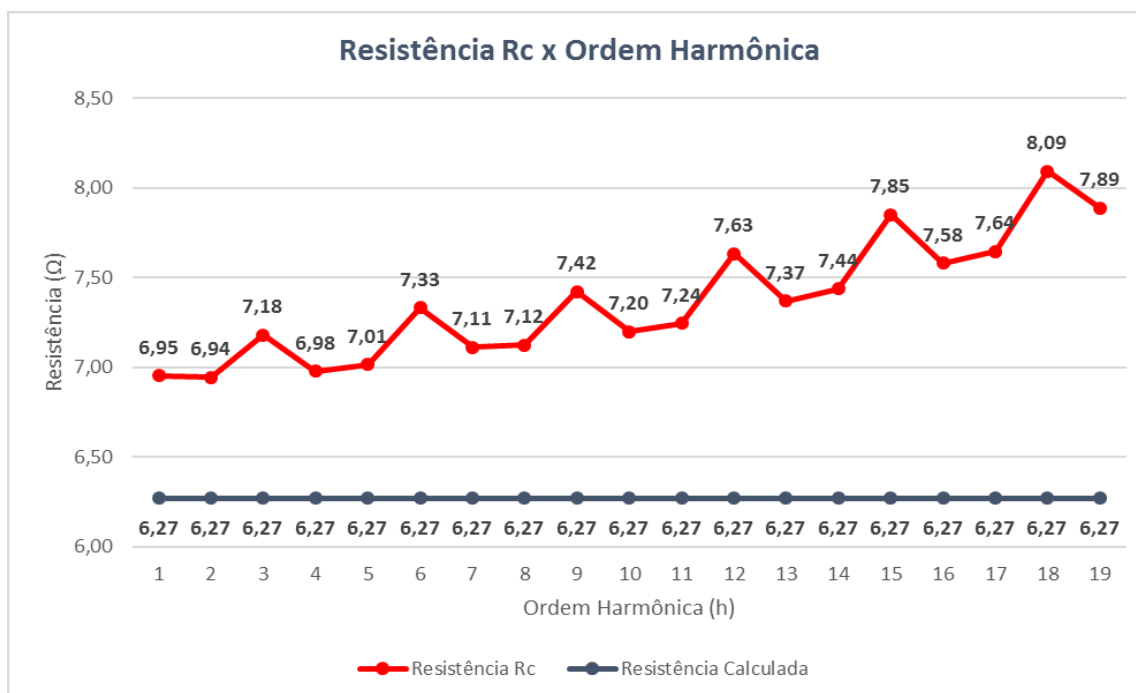
Para a indutância, os valores se mantiveram constantes, com pouca variação com o aumento das ordens harmônicas como mostra o Gráfico 14.

Gráfico 14 - Indutância Lb x Ordem Harmônica (Estrela-Estrela)



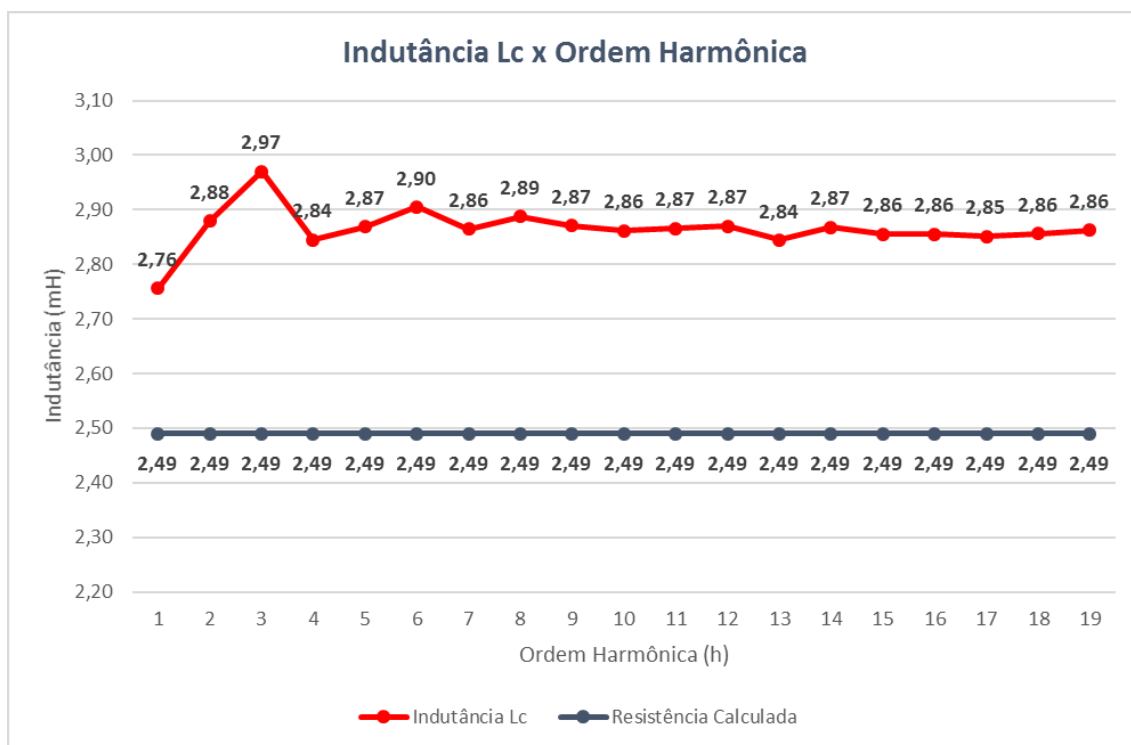
Semelhantemente as demais resistências apresentadas, pelo Gráfico 15 pode-se observar que a resistência Rc apresentou uma característica crescente com o aumento da ordem harmônica, sendo que para ordens múltiplas de 3, a resistência ficou acentuada devido ao Efeito Pelicular.

Gráfico 15 - Resistência Rc x Ordem Harmônica (Estrela-Estrela)



Para a indutância, os valores tiveram poucas oscilações com o aumento das ordens harmônicas.

Gráfico 16 - Indutância Lc x Ordem Harmônica (Estrela-Estrela)



### 3.6 Simulação – Ensaio em Curto com Harmônicos (Ligação Delta-Delta)

O objetivo deste tópico é realizar uma simulação da modelagem do transformador e fonte controlada afim de validar e comprovar o ensaio em curto com harmônicos realizado. Desta forma, utilizando o software Psim, foi possível modelar ambos os equipamentos com base nos parâmetros calculados no tópico 3.2.

Nas Figuras 18 e 19, mostra-se a parametrização feita no software e também o circuito simulado. Os valores de resistência e indutância foram multiplicados por 3 para se obter os parâmetros por fase. O transformador escolhido para simulação possui a ligação Delta-Delta, com número de espiras do secundário o mesmo do primário.

Para simulação da fonte controlada, foi colocado 19 fontes senoidais em série por fase, cada uma representando uma ordem harmônica com a magnitude sendo a mesma encontrada no ensaio em curto.

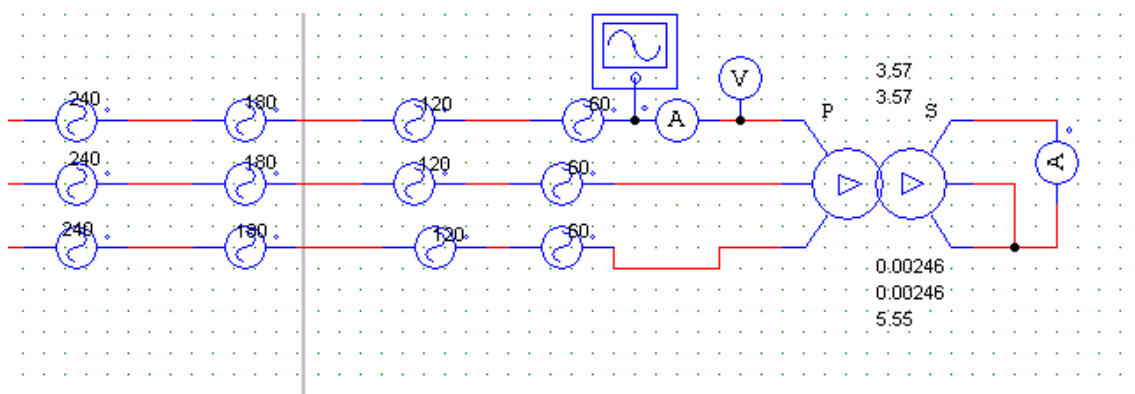


Figura 18 – Parametrização (Delta-Delta)

Parameter	Value	Display
Name	Trafo	<input type="checkbox"/>
Rp (primary)	3.57	<input checked="" type="checkbox"/>
Rs (secondary)	3.57	<input checked="" type="checkbox"/>
Lp (pri. leakage)	0.00246	<input checked="" type="checkbox"/>
Ls (sec. leakage)	0.00246	<input checked="" type="checkbox"/>
Lm (magnetizing)	5.55	<input checked="" type="checkbox"/>
Np (primary)	1	<input type="checkbox"/>
Ns (secondary)	1	<input type="checkbox"/>

Fonte: Elaborada pelo Autor.

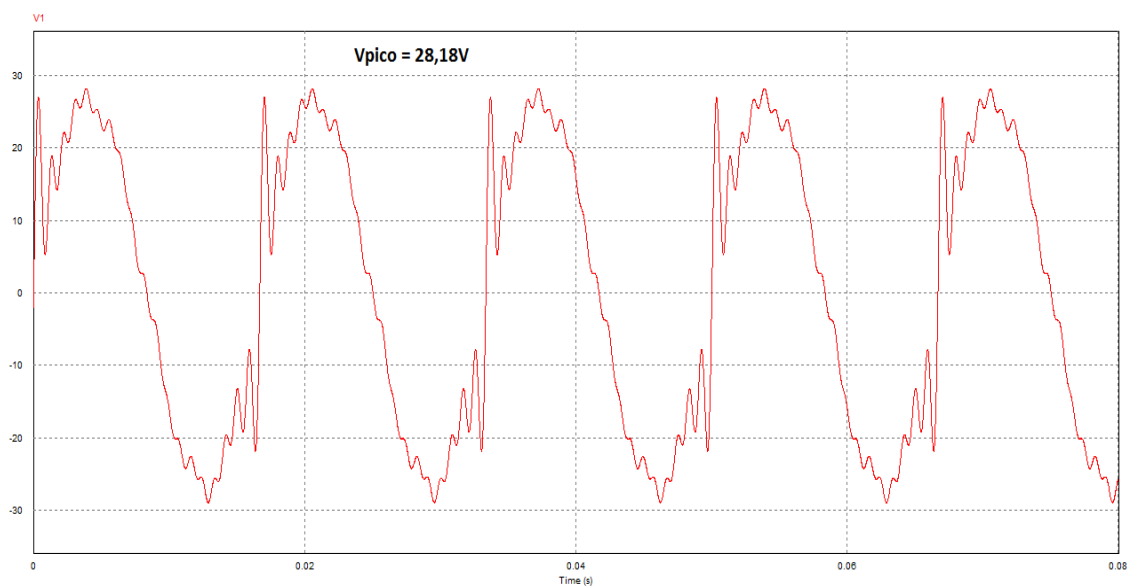
Figura 19 - Circuito Simulado (Delta-Delta)



Fonte: Elaborada pelo Autor

Na Figura 20, está representado a tensão simulada da fase A provinda das fontes senoidais em série. Comparativamente com o sinal da Figura 16, a tensão simulada possui uma boa representação, com o valor de pico de 28,18V e valor RMS de 20,18V.

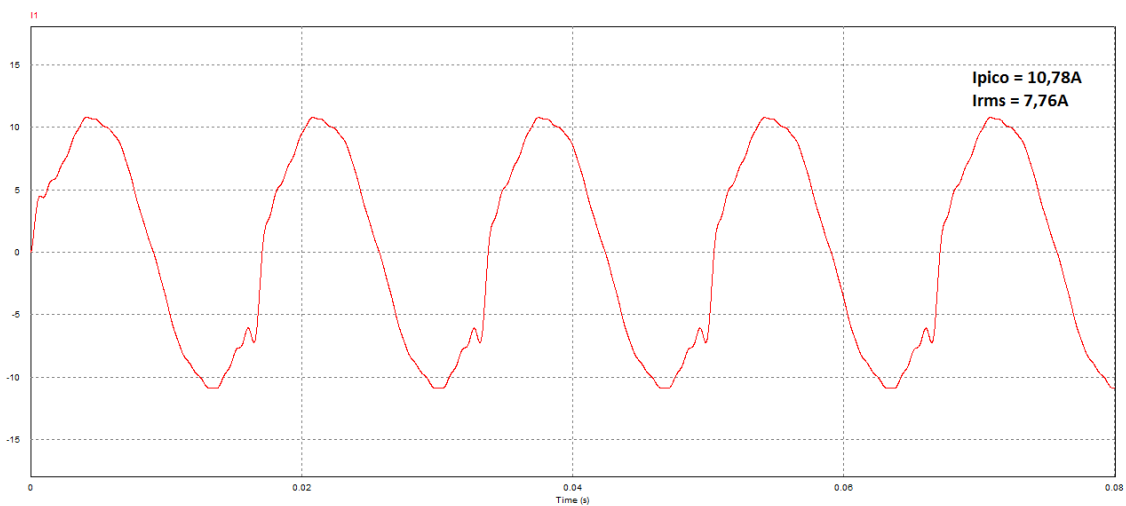
Figura 20 - Simulação da Tensão de Curto



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Na Figura 21, está representado a sinal distorcido da onda de corrente. Sua forma de onda mostra-se semelhante ao sinal provindo do ensaio como também a sua magnitude. O valor RMS encontrado na simulação foi de 7,76A, contra 7,84 do valor do ensaio, o que mostra a validade da simulação e do ensaio.

Figura 21 - Simulação da Corrente de Curto



Fonte: Elaborada pelo Autor.

### 3.7 Simulação – Ensaio em Curto com Harmônicos (Ligação Estrela-Estrela)

O objetivo deste tópico é realizar uma simulação da modelagem do transformador e fonte controlada afim de validar e comprovar o ensaio em curto com harmônicos realizado do transformador em ligação estrela-estrela. Desta forma, do mesmo modo apresentado na Seção 3.6, foi utilizado o software Psim, para modelagem e simulação com base nos parâmetros apresentados no Tópico 3.3.

Nas Figuras 22 e 23, mostra-se a parametrização feita no software e também o circuito simulado. O transformador escolhido para simulação possui a ligação Estrela-Estrela, com número de espiras do secundário o mesmo do secundário.

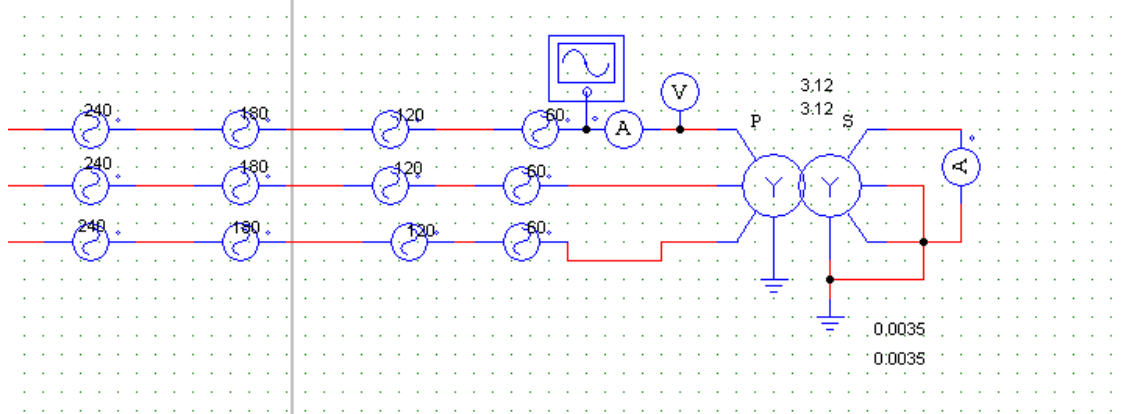
Para simulação da fonte controlada, foi colocado 19 fontes senoidais em série por fase, cada uma representando uma ordem harmônica com a magnitude sendo a mesma encontrada no ensaio em curto.

Figura 22 - Parametrização (Estrela-Estrela)

Parameter	Value	Display
Name	TYT1	<input type="checkbox"/>
Rp (primary)	3.12	<input checked="" type="checkbox"/>
Rs (secondary)	3.12	<input checked="" type="checkbox"/>
Lp (pri. leakage)	0.00135	<input checked="" type="checkbox"/>
Ls (sec. leakage)	0.00135	<input checked="" type="checkbox"/>
Lm (magnetizing)	5.55	<input type="checkbox"/>
Np (primary)	1	<input type="checkbox"/>
Ns (secondary)	1	<input type="checkbox"/>

Fonte: Elaborada pelo Autor.

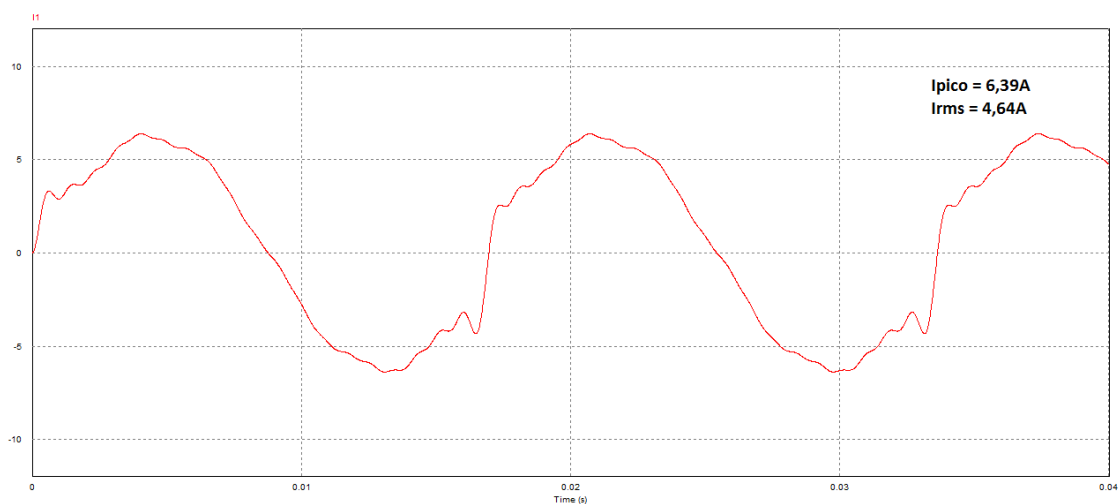
Figura 23 - Circuito Simulado (Estrela-Estrela)



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Na Figura 24, está representado o sinal distorcido da onda de corrente. Sua forma de onda mostra-se semelhante ao sinal provindo do ensaio em curto. O valor de corrente RMS simulado foi de 4,64A, contra 4,53A advindo do ensaio em curto, o que mostra a validade desta simulação e do ensaio em questão.

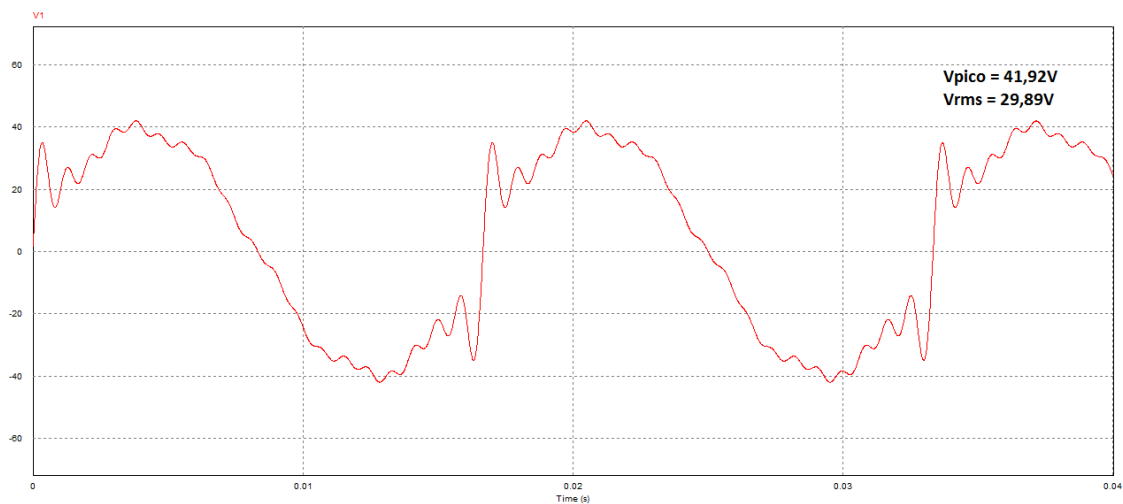
Figura 24 - Onda de Corrente Simulada (Estrela-Estrela)



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Para a onda de tensão, o valor RMS simulado foi de 29,89V sendo que o valor de ensaio para a fase A foi de 31,63V. A forma de onda da simulação e do ensaio ficaram de acordo.

Figura 25 – Onda de Tensão Simulada (Estrela-Estrela)



Fonte: Elaborada pelo Autor.

## 4 CONCLUSÃO

Nesta dissertação foi abordado um tema fundamental quando se trata de Qualidade de Energia, as distorções harmônicas. O foco em transformadores foi escolhido por se tratar de um elemento amplamente utilizado em qualquer patamar dos sistemas elétricos, distribuição, geração e transmissão, sendo assim, de extrema importância a sua modelagem e estudo sobre harmônicos.

A construção deste trabalho mostra no Tópico 1.1, uma contextualização do tema proposto, abordando as principais fontes geradoras de harmônicos, como por exemplo, inversores e conversores de frequência, sistemas fotovoltaicos e eólicos, cargas não lineares, etc.

No tópico 1.2, foi apresentado a fundamentação teórica dos ensaios a vazio e em curto de transformadores, apresentando as equações e procedimentos do ensaio. Este tópico foi de extrema importância para o desenvolvimento do tópico 3.2, onde as equações presentes no Tópico 1.2 foram referenciadas.

Nos tópicos subsequentes, foram feitas análises de inserção de harmônicos sobre transformadores, onde foi possível calcular a impedância harmônica para cada ordem e comprovar o ensaio realizado por meio de simulação no software Psim. Também, foi possível observar as semelhanças e divergências do comportamento das impedâncias harmônicas para duas ligações de transformadores distintas (delta-delta e estrela-estrela).

Por fim, os estudos sobre Distorções Harmônicas desta monografia mostraram o quanto é importante o conhecimento deste tema para a formação de um engenheiro eletricista e para área de Qualidade de Energia Elétrica.

## 5 REFERÊNCIAS

- 1 AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: ANEEL, 2005. 243p. Disponível em: . Acesso em: 29 abr. 2018.
- 2 CAMARGO, Jelson Machado de. **Análise do Desempenho Térmico e Vida Útil de Transformadores Alimentando Cargas não Lineares**. 2005. 265 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia Elétrica - Ufu, Ufu, Uberlândia, 2005. Cap. 01. Disponível em: <<http://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14647/1/JMcamargoDISSPRT.pdf>>. Acesso em: 01 out. 2005.
- 3 ANSI/IEEE C57.110D7, “**Recommended Practice for Establishing Transformer Capability, when Supplying Non-sinusoidal Load Currents**”, IEEE, NY, /febr. 1998.
- 4 Yang, Kai. **Wind-Turbine Harmonic Emissions and Propagation Through a Wind Farm**. 2012. 146f. Dissertação (Graduação em engenharia) - Lulea University of Technology - Suécia, 2012.
- 5 POMILIO, J.A. **Efeitos e causas de harmônicas no sistema de energia elétrica**, UNICAMP.
- 6 CAMARGO, J.R. **Transformadores de Potência**, UFU, 2014